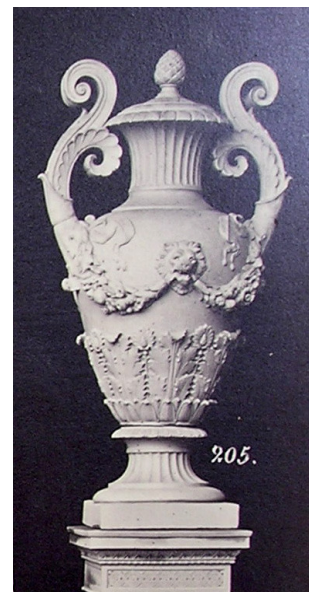


Abschlußbericht

DBU-Projekt Az. 21627-45:

„Beseitigung umweltbedingter Schadstoffanreicherungen auf wertvollen Architekturteilen und Bauzierelementen aus Terrakotta am Beispiel der Neuen Orangerie im Park Potsdam-Sanssouci (Brandenburg)“

Projektträger: Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg (SPSG)
Projektleitung: Dipl.-Rest. H.-C. Klenner, Leiter Abt. Restaurierung SPSG
Projektlaufzeit: 06.2003 bis 06.2006
Bearbeiter: Dipl.-Rest. (FH) Gerhard D'ham, Hildesheim
 Dipl.-Ing. Sven Wallasch, Potsdam
Datum: 17.06.2006



Gliederung

1	Einleitung	4
1.1	Zielsetzung des Forschungsprojektes	4
1.2	Teilaufgaben der Projektpartner	5
2	Inventarisierung, Zustandsbeschreibung und Umweltschäden in-situ erhaltener keramischer Bildwerke und Bauteile (Potsdam-Sanssouci und Potsdam-Babelsberg)	6
2.1	Preußische Terrakottaproduktion im 19. Jh.	6
2.2	Material- und Schadenskataster Terrakotta Potsdam-Sanssouci und Potsdam-Babelsberg (Gesamtbestand)	8
2.3	Bestandserfassung der Terrakottaamphoren der Neuen Orangerie	15
2.4	Zusammenfassung	19
3	Materialkundliche und bauklimatische Untersuchungen verschiedener Bestandsgruppen	20
3.1	Mikroskopische Untersuchungen zur Zustandserfassung des Terrakottabestandes Park Sanssouci	20
3.1.1	Vorbemerkungen	20
3.1.2	Untersuchungsergebnisse	21
3.1.3	Zusammenfassung	36
3.2	Materialkundliche Untersuchungen der Terrakottaamphoren der Neuen Orangerie	38
3.2.1	Vorbemerkungen	38
3.2.2	Untersuchungsergebnisse	39
3.2.3	Zusammenfassung	41
3.3	Makro- und mikroklimatische Charakterisierung der Terrakottaamphoren der Neuen Orangerie	42
3.3.1	Vorbemerkungen	42
3.3.2	Untersuchungsergebnisse	44
3.3.3	Zusammenfassung	50
4	Terrakottaziergefäße und Probekörper für Reinigungsversuche	51
4.1	Technologische Beschreibung der Ziergefäße	51
4.2	Technologische Beschreibung der Probekörper für Reihenversuche	53
4.3	Materialkundliche Charakterisierung der Ziergefäße und Probekörper	55
5	Versuchsaufbau zur Eignungsbeurteilung ausgewählter Reinigungsverfahren	57
5.1	Übersicht möglicher Reinigungsverfahren für Terrakotta	57
5.2	Ausgewählte Reinigungsverfahren	58
5.2.1	Trockenabrasives Feinstrahlverfahren	58
5.2.2	Rotationsstrahlverfahren	59
5.2.3	Untersuchte Strahlmittel	59
5.2.4	Kombinationsverfahren	60
5.2.5	Chemische Verfahren 1	61
5.2.6	Chemische Verfahren 2	61
5.2.7	Laserstrahlverfahren	62
5.3	Untersuchungsmethoden zur Feststellung des Reinigungsergebnisses	62
5.3.1	Untersuchungsmethoden in der Fachliteratur	62
5.3.2	Feststellung des visuellen Reinigungsergebnisses	64
5.3.3	Messung oberflächennaher physikalischer Eigenschaften	65
5.3.4	Mikroskopische Untersuchung von Schadensindikatoren	65
5.3.5	Mikroskopischer Zustandsvergleich vor und nach der Reinigung	68
5.3.6	Diskussion der Untersuchungsmethoden	69

5.4	Bewertungsmaßstäbe in den einzelnen Untersuchungskategorien	70
5.4.1	Reinigungsergebnis	70
5.4.2	Schädigungsgrad	71
5.4.3	Praktikabilität	74
5.4.4	Zusammenführung der Einzelbeurteilungen	75
5.4.5	Diskussion der Bewertungsmethoden	76
5.5	Diskussion des Versuchsaufbaus und Fehlerbetrachtung	76
6	Ergebnisse systematischer Reinigungsversuche an Probekörpern	77
6.1	Ergebnisse der Reinigungsversuche an Prüfkörpern des Typus Albanisches Gitter	77
6.1.1	Reinigungserfolg	77
6.1.2	Schädigungsgrad	79
6.1.3	Zusammenfassung	83
6.2	Ergebnisse der Reinigungsversuche an originalen Bruchstücken von Amphorenfuß und Amphore	85
6.3	Diskussion der Reinigungsergebnisse	88
7	Reinigung von Terrakottaoberflächen, Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	89
8	Ausblick zur Reinigungsproblemtik	92
8.1	Zur Übertragbarkeit der Projektergebnisse auf die Reinigungsproblematik anderer Objekte aus Terrakotta oder verwandten Materialien	92
8.2	Zur Übertragbarkeit der Untersuchungs- und Bewertungsmethode auf andere Materialien	92
8.3	Technische Alternativen zur Fotografie mittels Stereomikroskop	93
9	Modellhafte Restaurierungsmaßnahmen	94
9.1	Vorbemerkungen	94
9.2	Zerlegung und Reinigung	95
9.3	Fehlstellenbehandlung	97
9.4	Klebung und Rissinjektage	98
9.5	Montage und Wiederaufstellung	99
9.6	Maßnahmen an Referenzobjekten	99
10	Öffentlichkeitsarbeit	100
11	Verzeichnisse	101
11.1	Projektinterne Literatur	101
11.2	Weitere zitierte Literatur	102
12	Anhang	103
12.1	Angaben zur Reinigungstechnik und zu den Reinigungsmitteln	103
12.2	Mikroskopisch-fotografische Untersuchungs- und Dokumentationstechnik	107
12.3	Fotodokumentation des mit bloßem Auge sichtbaren Reinigungsergebnisses an Testflächen des Typus Albanisches Gitter	109
12.4	Bewertung von Schadensindikatoren an Testflächen des Prüfkörpertypus Albanisches Gitter	116
12.5	Bewertung von Schadensindikatoren an Testflächen des Prüfkörpertypus Amphorenfußbruchstück	123

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung des Forschungsprojektes

Zur Errichtung und Ausschmückung der zur Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg (SPSG) gehörenden Gebäude und Parkanlagen wurde insbesondere im 2. Drittel des 19. Jahrhunderts häufig Terrakotta verwendet. Voraussetzung hierfür waren produktionstechnische Fortschritte, die etwa ab 1830 die Fertigung auch großformatiger und kompliziert gestalteter Objekte in gleichbleibend hoher Qualität ermöglichten. Die im Vergleich zur Werksteinfertigung relativ kostengünstige serielle Produktionsweise trug zu der im weiteren Verlauf des 19. Jhs. zunehmenden Verwendung von Terrakotta auch an Verwaltungsbauten und Wohnhäusern bei. Terrakotten sind damit im Denkmalbestand von Brandenburg und Berlin auch außerhalb Preußischer Schlösser und Gärten häufig anzutreffen.

Die Oberflächen dieser Terrakotten weisen vielfach umweltbedingte, meist fest anhaftende graue oder schwarze Auflagerungen auf, die die ursprüngliche Farbigkeit der keramischen Oberflächen verdecken. Sie entstehen in Wechselwirkung natürlicher und anthropogener Umwelteinflüsse mit der spezifischen stofflichen Zusammensetzung und Struktur der Keramikobjekte. Diese als dünne Filme bis hin zu millimeterdicken Krusten reichenden Auflagerungen können weitere chemisch-physikalische Verwitterungsprozesse auslösen. Eine Entfernung oder zumindest Ausdünnung dieser Auflagerungen ist daher nicht nur aus ästhetischen Gründen wünschenswert, sondern vielfach konservatorisch geboten. Hierzu sind Reinigungsverfahren erforderlich, die die Keramikoberflächen nicht verletzen oder zerstören.

Wichtigstes Ziel des Forschungsprojektes ist die vergleichende Untersuchung hierfür geeigneter Reinigungsverfahren und die Schaffung eines Instrumentariums zur deren Bewertung. Ausgehend von Bauelementen der Neuen Orangerie in Potsdam-Sanssouci wurden hierzu systematische Reinigungsversuche durchgeführt und neuartige Ergebnisse gewonnen. Zur objektivierenden Feststellung und Bewertung der Reinigungsergebnisse wurden Methoden entwickelt und erprobt, die grundsätzlich auch auf andere Terrakottaobjekte übertragbar sind. Damit wird ein Instrumentarium bereit gestellt, das generell für die wissenschaftlich abgesicherte Planung, Durchführung und Qualitätssicherung von Reinigungsmaßnahmen an Terrakotten und anderen porösen mineralischen Baustoffen genutzt werden kann.

Das Vorhaben umfaßte im Wesentlichen folgende Bestandteile:

- Inventar in-situ erhaltener Terrakottaobjekte (baugebunden und solitär) in den Parkbereichen Sanssouci und Babelsberg, Erfassung und Systematisierung der darin vorzufindenden Umweltschäden sowie keramtechnischer, technologischer und bautechnischer Merkmale
- Archivrecherche zur Entstehungs- und Restaurierungsgeschichte des großen Amphorenprogramms der Neuen Orangerie als Hauptuntersuchungs- und Restaurierungsobjekte, insgesamt eine 35 Stücke umfassende Werkgruppe
- Materialkundliche und bauklimatische Untersuchungen der Schäden, vor allem Licht- und Elektronenmikroskopie, physikalisch-chemische Eigenschaften von Oberfläche und Scherben sowohl der Amphoren Neue Orangerie als auch entsprechender Referenzobjekte
- Technologische Untersuchungen (Verfahrens- und Parametervergleich) zur Reinigungsproblematik und Optimierung flankierender Restaurierungsmaßnahmen an
 - In-situ-Objekten (Neue Orangerie und Vergleichsobjekte)
 - Depotstücken (demontierte oder geborgene, eingelagerte Objekte)
 - geeigneten Ersatzmaterialien in Form einfacherer keramischer Objekte, wie spezieller Formziegel und anderweitig keramtechnisch vergleichbarer Objekte
- Komplexe Auswertung aller Erhebungen unter den Gesichtspunkten substanzschonender Reinigungsverfahren und –parameter sowie Aspekten der Wirtschaftlichkeit
- Modellhafte Umsetzung der Ergebnisse durch Teilrestaurierungen und Restaurierungen von in-situ- und Einzelobjekten der Neuen Orangerie sowie geeigneter Referenzobjekte

1.2 Teilaufgaben der Projektpartner

Projektpartner	Teilaufgabe	Pos.
Denkmalpflegerische Begleitung des Vorhabens		
Stiftung Preußische Schlösser und Gärten (SPSG), Abt. Restaurierung Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege und archäologisches Landesmuseum	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Restauratorische und denkmalpflegerische Begleitung und Beratung ▪ Erprobung der Laserreinigung für Terrakottauntergründe begleitend zu (7) ▪ Bereitstellung von Ausbauteilen und Depotterrakotten für Laboruntersuchungen, Probereinigungen etc. für (7) 	(1)
Visuelle Bestandserfassung / Inventarisierung und Charakterisierung von Umweltschäden an Terrakotten der Potsdamer Schlösser und Gärten		
Nora Pietrowski, cand.-rest.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Archivrecherche zu Firmenkatalogen historischer Terrakotta-manufakturen 	(13)
Kai Roetger, cand.-rest.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Archivrecherche und bauhistorische Untersuchung des Amphorenprogramms der Neuen Orangerie 	(2)
Sven Wallasch, Dipl.-Ing., Büro BfBK, nachfolgend FH Potsdam, Institut für Bauforschung und Bau-erhaltung (IBB)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Material- und Schadenskataster (Inventar) keramischer Bildwerke und Bauteile in Potsdam-Sanssouci und Potsdam-Babelsberg ▪ Projektsteuerung 	(3)
Steffi Hunger, cand.-rest. Jenny Pfeiffrock, cand.-rest.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bestands- und Zustandserfassung des Amphorenprogramms der Neuen Orangerie 	(4)
Tomas Grzimek, Golem GmbH Kunst- und Baukeramik	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keramische Beratung zu historischen Sondertechnologien der Keramikfertigung begleitend zu (3), (4) und (7) 	(9)
Analytische Erfassung von Umwelteinwirkungen, Umweltschäden sowie Materialeigenschaften an Terrakotten der Potsdamer Schlösser und Gärten		
Amtliche Materialprüfungsanstalt (MPA) Bremen, Dr. Frank Schlütter	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mikroskopische und weiterreichende analytische Untersuchungen von Oberflächenproben verschiedener keramischer Bildwerke und Bauteile im Park Sanssouci (Referenzproben) in Auswertung von (3) 	(5)
Wulf Eckermann, Dipl.-Ing., Bau-klima-Ingenieurbüro	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Langzeitklimamessung (Mikro- und Nahfeldklima) an geschädigten Terrakottaamphoren der Neuen Orangerie, Lokalisierung Meßstellen gemäß (4) 	(6)
Laboruntersuchungen zur Reinigungsproblematik, zu flankierenden Restaurierungsmaßnahmen und Durchführung modellhafter Werkstattrestaurierungen		
Fachhochschule Potsdam (FHP), Studienrichtung Steinrestaurierung, Prof. Gottfried Hauff, Dr. Peter Kozub	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Konzeption, Durchführung, Begleitung und Auswertung von 3 jeweils einjährigen Gruppenprojekten höherer Studiense-mester zur Reinigungsproblematik an Ausbauteilen und Depot-terrakotten unterschiedlichen Typs ▪ Objektspezifische Entwicklung von Klebe- und Ergänzungsmassen für flankierende Maßnahmen ▪ Entwicklung von Bewertungsroutinen zur Beurteilung des Reini-gungserfolges ▪ Beteiligung an der Durchführung von Musterrestaurierungen an Ausbauteilen und Depotterrakotten 	(7)
Astrid Will, Dipl.-Rest.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reinigungsversuche mit Ionenaustauscherharzen und Ammo-niumkarbonat an Ausbauteilen 	(8)
Amtliche Materialprüfungsanstalt (MPA) Bremen, Dr. Frank Schlütter	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ermittlung von Materialkennwerten begleitend zu (7), (8) und (6) für Terrakottagrundkörper und Klebematerialien ▪ Mikroskopische Begleitung ausgewählter Reinigungsversuche in Teilaufgabe (7) 	(10)
Gerhard D'ham, Dipl.-Rest.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Untersuchung und Bewertung von Reinigungsmustern, Entwick-lung der Bewertungsroutinen aufbauend auf (7) 	
Modellhafte Restaurierungsmaßnahmen Terrakotta Neue Orangerie		
Tom Zimmermann, Dipl.-Rest.; Eckhart Böhm, Dipl.-Rest.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reinigung, Klebung, Formergänzung usw. an Ausbauteilen und Depotterrakotten, z.T. mit Demontage und Rückversatz 	(11)
Tom Zimmermann, Dipl.-Rest.; Eckhart Böhm, Dipl.-Rest.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reinigung, Entsalzung, Schalenhinterfüllung usw. an Referenz-terrakotten (3 Reliefs Römisches Bad) 	(12)
Öffentlichkeitsarbeit		
SPSG, FHP; IBB	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gestaltung eines projektbezogenen Programmtages „Jugend recherchiert Umwelt“ 	(14)
SPSG, FHP, IBB	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ausstellungsinsel zum DBU-Projekt im Rahmen der Ausstellung „Marmor, Stein und Eisen bricht – Restaurierung in der SPSG“ mit Poster und Exponaten 	(15)
SPSG, FHP, IBB	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abschlußworkshop Schloß Lindstedt 	(16)

2 Inventarisierung, Zustandsbeschreibung und Umweltschäden in situ erhaltener keramischer Bildwerke und Bauteile (Potsdam-Sanssouci und Potsdam-Babelsberg)

2.1 Preußische Terrakottaproduktion im 19. Jahrhundert

Zum Begriff Terrakotta

Mit dem aus dem Italienischen entlehnte Begriff (terra cotta – gebrannte Erde) werden meist künstlerisch gestaltete bzw. plastisch ausgearbeitete keramische Objekte mit mehr oder weniger porösem, oft farbigem und meist nicht glasiertem Scherben bezeichnet. Je nach Zusammenhang werden so verschiedene Produkte wie figürliche Skulpturen und Reliefs, ornamentale plastische Gestaltungen, großformatige Gefäße, kompliziert geformte Maßwerkteile, ja gelegentlich auch relativ einfach gestaltete Formziegel mit dem Begriff Terrakotta belegt. Eine stringente formale Abgrenzung zu Ziegeleierzeugnissen wie Dach-, Mauer- und Formziegel oder Gefäßkeramik ist nicht gegeben.



Abb. 1: Auszug Musterkatalog March (Allegorien)



Abb. 2: Auszug Musterkatalog March (Formsteine)

Der Begriff umfasst ferner sowohl Unikate als auch mittels Abformtechniken realisierte Serienprodukte.

Auch in technischer Hinsicht fällt eine präzise Begriffsbestimmung schwer: Allen vorgenannten Produkten ist die Formgebung aus bildsamen Massen gemeinsam, die plastische Tonminerale enthalten, deren Mineralbestand sich nach vorhergehender Trocknung im Brennprozess irreversibel verfestigt. Die Arbeitsmassen zur Herstellung von Terrakotta, die neben den plastischen Tonbestandteilen meist auch magernde Zusätze enthalten, wurden im Unterschied zu Ziegeleierzeugnissen häufig mit besonderer Sorgfalt aufbereitet und sind vielfach recht feinkörnig, um eine zeichnungsscharfe Formgebung zu ermöglichen. In der Literatur wird häufiger der poröse Scherben, wie er bei relativ niedrigen Brenntemperaturen um 1000 °C entsteht, also deutlich unterhalb der Sinterung, als ein technisches Merkmal von Terrakotta herausgestellt. Jedoch werden gelegentlich auch Erzeugnisse mit sehr dichtem Scherben als Terrakotta bezeichnet, wenn sie den oben genannten formalen Kriterien einer plastischen bzw. künstlerischen Formgebung entsprechen.

Potsdamer Terrakottabestand¹

Wesentlichen Anteil an der Renaissance von Terrakotta in der Baukunst und Gartenarchitektur des 19. Jahrhunderts hatten Friedrich Schinkel und Friedrich Wilhelm IV. Als bekannteste, wegweisende Bauwerke Schinkels sind in diesem Zusammenhang die Friedrichwerdersche Kirche in Berlin (Bauzeit 1825-28) und die Bauakademie in Berlin (Bauzeit 1832-1836) zu nennen. Maßgeblichen Einfluss auf die Entwicklung nahm auch Friedrich Wilhelm IV, von 1840-1861 König von Preußen, der sich stets intensiv für Architektur interessierte, selber Entwürfe machte und häufig direkten Einfluss auf die Planung und Durchführung von Bauprojekten nahm. Der größte Teil der zwischen 1834 und 1879 datierten Terrakottaausstattung an den Bauwerken und in den Parkanlagen von Potsdam-Sanssouci verdankt sein Entstehen mittelbar Friedrich Wilhelm IV und seinem Leitbild einer südländisch geprägten Parkgestaltung.

¹ Wallasch (2004) Material- und Schadenskataster

Nach Skizzen der königlichen Baumeister wie Persius und Stüler oder des Königs selbst arbeiteten Künstler der Berliner Bildhauerschule wie z.B. Rauch, Wolff und Tieck die Entwürfe und z.T. auch die plastischen Modelle für die Terrakotten aus.

Die Herstellung der oft großformatigen und kompliziert geformten keramischer Skulpturen, Reliefplatten und Gartengefäße erforderte besondere technische Fertigkeiten. Neben einer Fehler freien Formausführung waren eine möglichst gleichmäßige Oberflächenfarbe und Witterungsbeständigkeit zu gewährleisten. Einige namhafte Baukeramikwerkstätten in Berlin und Potsdam verfügten über das hierfür notwendige keramiktechnologische Können und Wissen, das im Laufe der Jahre ständig verfeinert wurde. Zu nennen sind insbesondere folgende Werkstätten:

- Tobias Christoph Feilner (1773-1839), Berlin Fabrikant, „zweifelsohne der wichtigste Pionier und Wegbereiter der preußischen Baukeramikindustrie“², war eine besonders technisch-naturwissenschaftlich, aber auch künstlerisch interessierte Persönlichkeit, die zudem intensive Kontakte zu Berliner Architekten und Bildhauern pflegte. Er fertigte v. a. Ofenkacheln und Architekturkeramik. Die Terrakotta-ausstattung der Friedrichwerderschen Kirche stammt aus Feilners Werkstatt.
- Ernst March (1789-1838), Berliner Keramikproduzent, Schüler Feilners, erwarb sich bei seiner Tätigkeit in Frankreich und England besondere Kenntnisse in der Technologie von Hochbrandkeramik. Das Produktspektrum umfasste sowohl hochwertige individuelle Einzelanfertigungen als auch seriell gefertigte Waren. Das Unternehmen wurde nach dem Tode Marchs erfolgreich von seiner Frau und seinen Söhnen bis 1902 fortgeführt.
- August Cornelius Gormann (1796-1861), Berliner Töpfermeister, fertigte die Reliefs für die Schinkelsche Bauakademie und das Bacchantenrelief der Römischen Bäder in Potsdam-Sanssouci.
- Wilhelm Koch (1815-1889), Potsdam, lieferte die Säulen der Friedenskirche Potsdam.

Ergänzende Informationen zu den Sortimenten dieser Manufakturen wurden von PIETROWSKI³ vorgelegt, da es gelang, im Rahmen einer gesonderten Recherche, einige der historischen Firmenkataloge ausfindig zu machen.

Damit wurde z.T. die kunsthistorisch wichtige Zuordnung einiger Objekte zu den entsprechenden Manufakturen möglich.

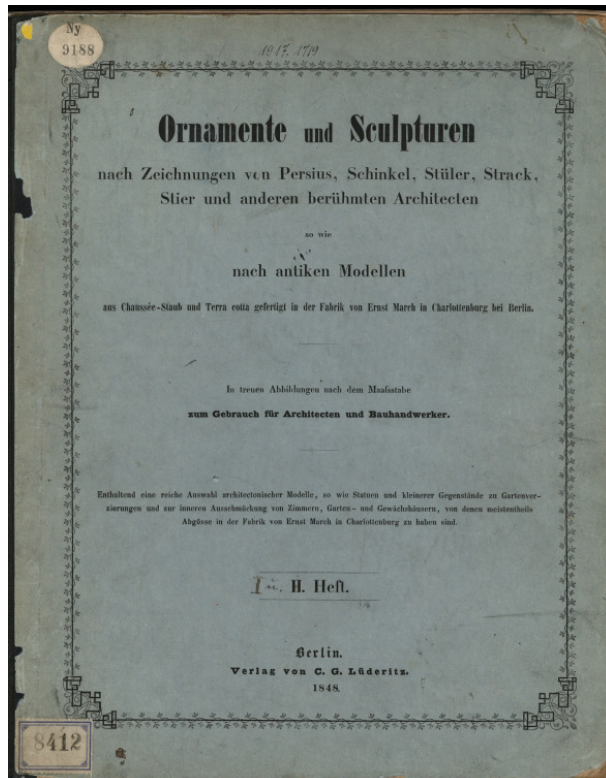


Abb. 3: Deckblatt des ältesten March-Kataloges (1848)

² ebenda, S. 3

³ Pietrowski (2005) Archivrecherche zu historischen Firmenkatalogen Preußischer Terrakottamanufakturen

2.2 Material- und Schadenskataster Terrakotta Potsdam-Sanssouci und Potsdam-Babelsberg (Gesamtbestand)⁴

Gegenstand des Material- und Schadenskatasters ist ein Bestandsinventar von Bildwerken und Bauteilen aus Terrakotta, also verschiedenartiger Objekte in den Parkanlagen Potsdam-Sanssouci und Babelsberg. Im Unterschied zu den bekannten kunsthistorischen Inventaren^{5 6} wurde der Schwerpunkt der Inventarisierung auf die Beschreibung keramtechnischer, werktechnischer und technologischer in-situ Befunde gelegt. Weiterhin wurden objektweise typische Schadensbefunde und Schadensfälle erfaßt, die auf umweltbedingte Alterungs- und Verwitterungsprozesse zurückgeführt werden können. Über die o.g. kunsthistorischen Inventare weiterhin hinausgehend ist, neben der Bearbeitung des Parkbereichs Babelsberg, die Erfassung von Formsteinen sowie teilweise Formziegeln.

Das Ziel dieses Material- und Schadenskatasters ist:

- Erfassung werktechnischer und technologischer Eigenschaften
- Erfassung von Material- und Objektschäden, Befunden
- Erfassung besonderer Standort-, Klima- und Umweltbedingungen
- Untersuchungsplan entwickeln (Entnahme von Referenzproben)
- Reproduzierbare Objekt- und Zustandsdokumentation

Im Rahmen des Gesamtprojektes trug dieses Kataster insbesondere zu einer objekt- und bestandsorientierten Untersuchung der Reinigungsproblematik durch die Fachhochschule Potsdam bei.

Bestandsübersicht Terrakotta Park Sanssouci und Babelsberg:

Objekt-Nr.	Objekt	Standort	Vermutliches Versetzjahr
Park Sanssouci			
S 1.1.1	Panmaske	Römische Bäder	1834
S 1.1.2	Satyrmaske	Römische Bäder	1834
S 1.1.3	Bacchantengelage	Römische Bäder	1834
S 1.2	Mauerabdeckung	Römische Bäder	1834-1836
S 1.3	Säulengruppe	Römische Bäder	1836-1837
S 1.4	Gewölbeverblendung	Römische Bäder	1834-1836
S 1.5	Albanisches Gitter	Römische Bäder	1836-1837
S 2.1	Kindergruppe	Baldachinfantäne	1850
S 3.1	Heilsbronner Portal	Friedenskirche	1863
S 3.2	Säulengruppe	Friedenskirche	1852-1854
S 3.3	Vasengruppe	Küsterhaus	1879
S 3.4	Vasengruppe	Pförtnerhaus	1849-1851
S 4.1	Brüstungsfelder	Villa Illaire	1844
S 4.2	Apsisgitter	Villa Illaire	1851
S 4.3	Schale	Villa Illaire	1844-1846
S 4.4	Vase	Villa Illaire	1844-1846
S 5.1	Skulptur Hebe	Villa Liegnitz	1845 ab
S 6.1	Vasengruppe	Neue Kammern	1840 ab
S 7.1	Vasengruppe	Neue Orangerie	1860
S 7.2	Skulptur, Große Herkulanerin	Neue Orangerie	1860
S 7.3	Skulptur, Gewandstatue	Neue Orangerie	1860
S 8.1	Säulengruppe	Paradiesgarten	k.A.
S 8.2	Säulengruppe	Paradiesgarten	k.A.
Park Babelsberg			
B 1.1	Formsteinfries	Schloß Babelsberg	1844-1849
B 1.2	Formsteinfries mit Formziegeln	Schloß Babelsberg	1844-1849
B 1.3	Formsteinfries	Schloß Babelsberg	1844-1849
B 1.4	Formsteinfriese	Schloß Babelsberg	1844-1849
B 1.5	Formsteinfriese	Schloß Babelsberg	1844-1849
B 1.6	Brüstungsfelder	Schloß Babelsberg	1844-1849
B 1.7	Balkonbrüstungen	Schloß Babelsberg	1844-1849
B 1.8	Balkonbrüstungen	Schloß Babelsberg	1844-1849
B 2.1	Formsteinfriese	Maschinenhaus	1843-1844
B 2.2	Formsteinfriese	Maschinenhaus	1843-1844
B 3.1	Formsteinfriese, Vierpaß	Matrosenhaus	1842
B 3.2	Formsteine, Maßwerkrosetten	Matrosenhaus	1842
B 3.3	Formsteine, Ringelemente	Matrosenhaus	1842
B 3.4	Formsteinfriese, Dreipaß	Matrosenhaus	1842
B 4.1	Vogel 'Kaak'	Gerichtslaube	2. H. 13. Jh.

⁴ Wallasch (2004) Material- und Schadenskataster

⁵ Lippold (1994) Die Terrakotten von Potsdam-Sanssouci

⁶ Hüneke (2002) Bauten und Bildwerke im Park Potsdam Sanssouci

Zur Vereinheitlichung der Objekterfassung wurde eine Daten-Eingabemaske als Excel-Datei entwickelt. Diese Excel-Maske bietet die Möglichkeit, wenn erforderlich in eine entsprechende Access- oder Filemaker-Datenbank konvertiert zu werden, wodurch den gängigen Datenbanksystemen Rechnung getragen wird. Unabhängig davon kann eine weitere Objekt- oder Dateneingabe jederzeit in der vorhandenen Excel-Maske vorgenommen werden.

Jedes inventarisierte Objekt wird auf einem 3-seitigen Satz von Datenblättern beschrieben. Der Kopf jedes Datenblattes eines Satzes ist dabei identisch und enthält die sogenannten Stammdaten des Objektes. Im Falle einer auszugsweisen Vervielfältigung kann somit jederzeit eine zweifelsfreie Zuordnung des Datenblattes erfolgen.

Stammdaten, Kopf der Datenblätter Seite 1 bis 3:

OBJEKT - NUMMER :	Die Unterscheidung der Objekte erfolgt in der Reihenfolge: <ul style="list-style-type: none">▪ Parkbereich (1. Buchstabe)▪ dann Ziffer zur Identifikation des Bauwerkes oder Ziffer zur Identifikation als Einzelobjekt (1. Ziffer der Kolonne)▪ dann Nummer des Objektes oder der Objektgruppe am Bauwerk (2. Ziffer der Kolonne)▪ dann bei Objektgruppen Nummer des Einzelobjektes (3. Ziffer der Kolonne) Beispiel: S/X.X.X oder B/X.X.X wobei: S/X.X.X: Objekt im Park S anssouci B/X.X.X: Objekt im Park B abelsberg S/ X.X.X: 1. Ziffer der Kolonne: Nummer Bauwerk oder Einzelobjekt S/X. X.X: 2. Ziffer der Kolonne: Nummer Objektgruppe oder Objekt am Bauwerk S/X.X. X: 3. Ziffer der Kolonne: bei Objektgruppen Nr. des Einzelobjektes
OBJEKT :	Kurze Verschlagwortung
STANDORT :	Park > Parkbereich > Bauwerk oder Einzelobjekt > Bauteil
ENTSTEHUNGSJAHR :	Jahr der Herstellung des Objektes
VERSETZJAHR :	Jahr des Einbaus bzw. der Aufstellung
INVENTAR - NR. :	Objektkennung nach Nomenklatur Skulpturensammlung
KATALOG - NR. :	Objektkennung nach Nomenklatur HÜNEKE
ENTWURF :	Schöpfer der bildhauerischen Vorlage bzw. Baumeister bzw. Zuordnung Werkstatt
AUSFÜHRUNG :	Herstellungswerkstatt des keramischen Objektes

Datenblatt Seite 1:

Die Seite 1 enthält den Datensatz

- **ART DES OBJEKTES** und
- **AUFBAU UND ABMESSUNG DES OBJEKTES.**

ART DES OBJEKTES gibt eine formale, typologische Einordnung des Objektes nach den Kategorien

- **SKULPTUR**
- **FREIPLASTIK**
- **PLASTIK**
- **BAUTEIL**
- **FORMSTEINE**
- **FORMZIEGEL**

Der Datensatz verzweigt weiter nach

- **BILDWERK- oder OBJEKTGRUPPE** und
- **EINZELOBJEKT**

Handelt es sich um ein **EINZELOBJEKT** wird verzweigt nach **MONOLITHISCH** oder **MEHRTEILIG** um den Grundaufbau zu kennzeichnen. Es folgt abschließend die Einstufung **ORIGINAL** oder **KOPIE** oder **SPOLIE**.

Der folgende Datensatz **AUFBAU UND ABMESSUNG DES OBJEKTES** ´zerlegt´ das jeweilige **OBJEKT** in seine möglichen **TEILOBJEKTE** bis hin zum **ELEMENT** als unterste gefügetechnische Einheit und ´kleinstem Baustein´. Den jeweiligen Objekten, Teilobjekten und Elementen können Abmessungen und Materialangaben zugeordnet werden.

Datenblatt Seite 2:

Das Datenblatt Seite 2 beinhaltet folgende Datensätze

- **FUGENMATERIAL UND VERBINDUNGSMITTEL**
- **WERKTECHNISCHE BEFUNDE**
- **STANDORTBEDINGUNGEN**
- **EINBAUSITUATION**
- **SCHÄDEN**
- **FRÜHERE MAßNAHMEN**
- **MAßNAHMEBEDARF**
- **LITERATUR / QUELLEN**

Erläuterung der wichtigsten Datensätze:

FUGENMATERIAL UND VERBINDUNGSMITTEL gestattet eine differenzierte Unterscheidung der verwendeten Mörtelmaterialien für den Versatz, das Vermauern, das Verfugen, Bauteilanschlüsse sowie sonstige Hilfsmittel wie Keile, Bleiplättchen usw.

WERKTECHNISCHE BEFUNDE bietet 11 Merkmale die insbesondere die handwerkliche Behandlung der Terrakottaoberfläche sowie die Brennfarbe des keramischen Scherbens betreffen können.

STANDORTBEDINGUNGEN kennzeichnet Merkmale der Exposition, Vegetationsbesonderheiten, anthropogene Belastungen sowie den Charakter des Untergrundes.

SCHÄDEN bietet 24 Merkmale, die typische und häufige Schadensformen der Terrakottaoberfläche, des Terrakottagrundkörpers sowie eventueller Beschichtungen bis hin zu Schäden des Terrakotta tragenden Mauerwerkskörpers beschreiben.

Datenblatt Seite 3:

Das Datenblatt Seite 3 erlaubt die Einordnung entsprechender Detailfotos zu den Objekten.

Überblick Herstellungseinflüsse

Im Ergebnis der Erfassung von 38 Einzelobjekten bzw. Objektgruppen ist eine pauschale, quantitativ orientierte Beurteilung werktechnischer und schadenspezifischer Merkmale nicht angestrebt, als auch nicht möglich und sinnvoll. Sowohl die stoffliche Bandbreite der keramischen Objekte und Grundkörper als auch ihre unterschiedliche finale Oberflächenbearbeitung vor dem Brand bilden unterschiedlichste Ausgangssituationen für eine später einsetzende Materialschädigung und Verwitterung.

Jeder Verfahrensschritt zur Herstellung von Terrakotten verlangt sehr viel z.T. handwerkliches und z.T. künstlerisches Geschick, dementsprechend vielfältig die Beeinflussung des Endproduktes in seinen technischen Eigenschaften, wie der Dauerhaftigkeit und Verwitterungsbeständigkeit:

- Herstellung der maßstäblich vergrößerten (bildhauerischen) Vorlage
- Formenbau
- Tonrohstoffgewinnung
- Rohstoffaufbereitung und –mischung
- Formgebung
- Nachbearbeitung / Oberflächenbehandlung
- Trocknung
- Brand (bei Glasuren Schrühbrand als 1. Brand)
- Glasieren
- 2. Brand (Glasurbrand)

Die historische Entwicklung der Herstellungstechnologien für Terrakottaware ist in den genannten Verfahrensschritten durch eine Vielzahl rohstoffseitiger wie auch fertigungstechnischer Verbesserungen des Zeitraumes von 1830 bis etwa 1880 geprägt. Sowohl das sich akkumulierende Wissen um die Beeinflussung der Materialeigenschaften als auch der dazu notwendigen Verfahren führten besonders im 19.

Jahrhundert zu einer später nicht mehr erreichten Perfektion der Terrakottaproduktion im Hinblick auf die Gestaltung der Oberflächen. Spezielle Rezepturen, Formgebungs- und Brennverfahren wurden entwickelt. Bedingt durch diese Entwicklungen und Verfeinerungen der keramischen Herstellungstechnologie sind diese Objekte mit empfindlichen Oberflächen wie z.B. feinsten Brennhäuten, Behautmassen oder Engoben⁷ ausgestattet.

Überblick Befunde

Die Untersuchung der Objekte zeigt deutlich, daß die für die Potsdamer Schlösser arbeitenden Keramikwerkstätten des 19. Jahrhunderts ihren zum Teil eigenständigen Duktus entwickelten. Sowohl im Hinblick auf die Formensprache als auch die Werktechnik und Materialbehandlung lassen sich teils markante Unterschiede ausmachen. Werktechnische Merkmale, insbesondere werkstofftechnische Besonderheiten, äußern sich bei erster Betrachtung mittelbar

- in der Brennfarbe
- den Scherbeneigenschaften (Porosität, 'Rauhigkeit')
- (auch) dem Grad der plastischen Ausformung.

In diesen Kriterien spiegeln sich bestimmte Vorlieben einzelner Werkstätten in der Auswahl des Tonrohstoffes wieder: Der bewußt gewählte Rohstofftyp und seine spätere Aufbereitung (z.B. Magerung mit Schamotte⁸) und das Brennregime bestimmten das Brennfärbenpotential und die Bildsamkeit (Formgebungspotential) der ungebrannten Rohmasse. Ebenso bestimmt der Rohstofftyp die notwendige Brenntemperatur. Tendenziell unterscheiden sich hierbei z.B. die Arbeiten von Feilner und March (als Hauptlieferanten) zumindest in der Fabrikationsperiode bis etwa 1845. Feilner'sche Fabrikate besitzen oft eine hellen, orangeroten und relativ weichen Scherben, der sich bei relativ niedrigen Brenntemperaturen ausbildete. Im Unterschied dazu die scharfgefeuerten, oftmals tiefroten Objekte von March.

Bei den untersuchten Terrakotten lassen sich über die oben genannten werkstofftechnischen Besonderheiten hinausgehend folgende markante Unterschiede resp. Merkmale feststellen:

- Vorhandensein von Behautmassen vor allem bei frühen, überwiegend plastisch gestalteten Objekten
- Engoben kaum sicher nachweisbar
- Nachbearbeitungsspuren unterschiedlicher Qualität
- Schamotteanteile im Scherben
- sehr zahlreiche Farbfassungsbefunde

Zu den technologisch herausragenden Objekten die seltene Werktechniken verkörpern gehören u.a.:

- Farbige ornamentierte Formsteinfriese des Maschinenhauses Babelsberg (sehr seltene 'enkaustische'⁹ Technik der Oberflächendekoration von Formsteinen)
- Brüstungsfelder Süd des Stibadiums der Villa Illaire (feine, vegetabile Flachreliefs bei sehr schwindanfälligen Ton; Hinweis auf mögliche Sekundär- oder Zweitchargenverwendung)
- Säulen des Kreuzganges der Friedenskirche (seltene, handwerklich getöpferte Säulentrommeln im Unterschied zur 'normalen' Formsteinware)
- Bacchantengelage der Großen Laube der Römischen Bäder (Behautmassen, Werkzeugspuren)

In Auswertung der bisherigen Erhebungen stehen folgende Faktoren oft in einem lokalen Zusammenhang zu Oberflächen- und Strukturschäden der Terrakotten:

Faktor	Schaden
▪ Behautmasse	▪ Schalenbildung bedingt durch schlechte Materialanpassung der Behautmasse an den Grundscherben
▪ Krusten und Beläge	▪ Entfestigung des darunterliegenden Gefüges (subkutane Entfestigung)
▪ Ausblühungen	▪ Kristallisationsschäden infolge Salzbelastung (Effloreszenzen, Subfloreszenzen)
▪ Kalkfahnen aus Bindemittelauswaschungen Mörtel	▪ Feuchteschäden infolge Verdunstungshinderung, Scherspannungen
▪ Trocken- und Brennschwindung hoch	▪ Rissbildungen, Gefügeschäden

Im folgenden sind exemplarisch für ein Objekt- bzw. eine Objektgruppe die jeweiligen Erfassungsbögen wiedergegeben:

⁷ Engobe: dünnflüssig aufgebrachte und eingebrannte Tonsuspension zur Farbangleichung

⁸ Schamotte, früher Chamotte: gebrannter und wieder aufgemahlener Ton als Grus, keramisches Halbprodukt und Magerungsmittel

⁹ Irreführende Bezeichnung des 19. Jahrhunderts für die benachbarte Verwendung unterschiedlich farbig brennender Tone auf einem Formstein


Erfassungsbogen Bauterrakotta				Objekt-Nr. S 1.3	Blatt-Nr. 1/3						
				Bearbeiter:	S. Wallasch						
				Datum:	02-10.2004						
Lokalisierung und Objektangaben											
Ort:	Potsdam	Kreis:	Potsdam-Stadt	Reg.-Bezirk:							
Objekt:	Säulengruppe										
Standort:	Park Sanssouci, Römische Bäder, Römisches Bad, Säulengang zum Maschinenteich										
Entstehungsjahr:	1836 (?)	Inventar-Nr.:	k.A.	Katalog-Nr.:	k.A.						
Versetzjahr:	1836-1837 (?)	Eigentümer:	Stiftung Preußische Schlösser und Gärten								
Entwurf:	L. Persius (?)	Ausführung:	T.C. Feilner								
Art des Objektes											
<input type="checkbox"/>	Skulptur	<input type="checkbox"/>	Freiplastik	<input type="checkbox"/>	Plastik	<input checked="" type="checkbox"/>	Bauteil	<input type="checkbox"/>	Formsteine	<input type="checkbox"/>	Formziegel
<input type="checkbox"/>	Bildwerkgruppe	<input type="checkbox"/>	Bildwerkgruppe	<input type="checkbox"/>	Bildwerkgruppe	<input checked="" type="checkbox"/>	Objektgruppe	<input type="checkbox"/>	Objektgruppe	<input type="checkbox"/>	Objektgruppe
<input type="checkbox"/>	Einzelbildwerk	<input type="checkbox"/>	Einzelbildwerk	<input type="checkbox"/>	Einzelbildwerk	<input type="checkbox"/>	Einzelobjekt	<input type="checkbox"/>	Einzelobjekt	<input type="checkbox"/>	Einzelobjekt
<input type="checkbox"/>	monolithisch	<input type="checkbox"/>	monolithisch	<input type="checkbox"/>	monolithisch	<input type="checkbox"/>	monolithisch	<input type="checkbox"/>	monolithisch	<input type="checkbox"/>	monolithisch
<input type="checkbox"/>	mehrtellig	<input type="checkbox"/>	mehrtellig	<input type="checkbox"/>	mehrtellig	<input type="checkbox"/>	mehrtellig	<input type="checkbox"/>	mehrtellig	<input type="checkbox"/>	mehrtellig
<input type="checkbox"/>	Original	<input type="checkbox"/>	Original	<input type="checkbox"/>	Original	<input checked="" type="checkbox"/>	Original	<input type="checkbox"/>	Original	<input type="checkbox"/>	Original
<input type="checkbox"/>	Kopie	<input type="checkbox"/>	Kopie	<input type="checkbox"/>	Kopie	<input type="checkbox"/>	Kopie	<input type="checkbox"/>	Kopie	<input type="checkbox"/>	Kopie
<input type="checkbox"/>	Spolie	<input type="checkbox"/>	Spolie	<input type="checkbox"/>	Spolie	<input type="checkbox"/>	Spolie	<input type="checkbox"/>	Spolie	<input type="checkbox"/>	Spolie
Aufbau und Abmessung des Objektes											
Kurzbeschreibung:		Säulengang aus 6 korinthischen Säulen auf Futtermauer aus Kalksteinzyklopenmauerwerk am Maschinenteich									
Aufbau Objekt	Teilobjekt	Anzahl Teilobjekte	Material	Höhe / Breite / Tiefe / Dicke in cm							
<input type="checkbox"/>	Einzelobjekt oder -bildwerk										
<input type="checkbox"/>	Bildwerk- oder Objektgruppe										
<input checked="" type="checkbox"/>	Objektgruppe	Säule, korinthisch	6	-	210 / k.A. / k.A. / k.A.						
Aufbau (Teil-)Objekt	Beschreibung Element										
<input checked="" type="checkbox"/>	Element 1	Säulenbasis			Sandstein	12,5 / 41,5 / 41,5 / k.A.					
<input checked="" type="checkbox"/>	Element 2	Säulentrommel unten, kanneliert			Terrakotta	71,0 / 35,5 / 35,5 / k.A.					
<input checked="" type="checkbox"/>	Element 3	Säulentrommel mitte, kanneliert			Terrakotta	69,0 / 33,0 / 33,0 / k.A.					
<input checked="" type="checkbox"/>	Element 4	Säulentrommel oben, kanneliert			Terrakotta	73,0 / 31,0 / 31,0 / k.A.					
<input checked="" type="checkbox"/>	Element 5	Säulenkapitell			Terrakotta	42,0 / 45,0 / 45,0 / k.A.					
<input type="checkbox"/>	Element 6										
	weitere										
											
Foto 1: Blick in den Säulengang nach Süd mit Setzungsschäden am Bodenbelag					[Bild-Nr.: d017.jpg]						

Abb. 4: Erfassungsbogen Bauterrakotta, Teil 1

Erfassungsbogen Bauterrakotta				Objekt-Nr.	Blatt-Nr.
				S 1.3	2/3
				Bearbeiter:	S. Wallasch
				Datum:	02-10.2004
Lokalisierung und Objektangaben					
Ort:	Potsdam	Kreis:	Potsdam-Stadt	Reg.-Bezirk:	
Objekt:	Säulengruppe				
Standort:	Park Sanssouci, Römische Bäder, Römisches Bad, Säulengang zum Maschinenteich				
Entstehungsjahr:	1836 (?)	Inventar-Nr.:	k.A.	Katalog-Nr.:	k.A.
Versetzjahr:	1836-1837 (?)	Eigentümer:	Stiftung Preußische Schlösser und Gärten		
Entwurf:	L. Persius (?)	Ausführung:	T.C. Feilner		
Fugenmaterial und Verbindungsmittel					
Fugenmörtel	<input checked="" type="checkbox"/>	Verfugmörtel	<input checked="" type="checkbox"/>	Versatzmörtel	<input type="checkbox"/>
Verlegemörtel	<input type="checkbox"/>	Vergußmörtel	<input type="checkbox"/>	sonstige	<input type="checkbox"/>
Werktechnische Befunde					
Inschrift/Signatur	<input type="checkbox"/>	Stempel	<input type="checkbox"/>	Garnierung	<input checked="" type="checkbox"/>
Fassung	<input checked="" type="checkbox"/>	Engobe	<input type="checkbox"/>	Glasur	<input type="checkbox"/>
Formspuren	<input type="checkbox"/>	Werkzeugspuren	<input checked="" type="checkbox"/>	Kittung	<input type="checkbox"/>
Anstrich	<input type="checkbox"/>				
Brennfarbe:	<input type="checkbox"/>	tieftrot	<input type="checkbox"/>	ziegelrot	<input checked="" type="checkbox"/>
orangerot	<input checked="" type="checkbox"/>	beige	<input type="checkbox"/>	sonstige	<input type="checkbox"/>
Standortbedingungen					
Exposition	Klima	Nahfeld 1	Nahfeld 2	Untergrund	Depot
Nord	sonnig	<input checked="" type="checkbox"/> Wiese	Bewuchs	Erdreich	
<input checked="" type="checkbox"/> Ost	<input checked="" type="checkbox"/> halbschattig	Sträucher	Verkehr	Fläche versiegelt	
Süd	schattig	Bäume	Emissionen	<input checked="" type="checkbox"/> Mauerwerk	
West		<input checked="" type="checkbox"/> Bebauung	<input checked="" type="checkbox"/> Wetterschutz	sonstige	
freistehend		<input checked="" type="checkbox"/> Gewässer			
Innenraum					
Einbausituation					
zum Säulengang orientierte Oberflächen witterungsgeschützt, trotzdem keine Expositionsabhängigkeit der Oberflächenschäden; Säulen mit teilweise deutlicher Lotabweichung in Folge des Gründungsschadens, Verformung der Futtermauer (Ausbauchung durch vmtl. Silodruck), Setzung des Plattenbelages, ausgeprägte Horizontal- und Vertikalrisse in den Säulentrommeln (vmtl. statische Risse)					
Schäden					
Absanden	<input checked="" type="checkbox"/>	Beläge	<input checked="" type="checkbox"/>	Risse, statisch	Anstrichschaden
Feuchteschaden	<input type="checkbox"/>	Teilverlust	<input type="checkbox"/>		
<input checked="" type="checkbox"/> Abschuppen		Krusten	<input type="checkbox"/>	Risse Brenntechnik	<input checked="" type="checkbox"/> Fassungsschaden
Feuchte, aufsteigend	<input type="checkbox"/>	Bewuchs, biogen	<input type="checkbox"/>		
Schalenbildung	<input type="checkbox"/>	Kalkfahnen	<input type="checkbox"/>	Craquelé	Fugenschaden
Gründungsschaden	<input checked="" type="checkbox"/>	Reliefbildung	<input type="checkbox"/>		
Glasurschaden	<input type="checkbox"/>	Ausblühungen	<input type="checkbox"/>	Rostsprengung	Bauteilanschlüsse
Ausbruch	<input checked="" type="checkbox"/>	sonstige	<input type="checkbox"/>		
Frühere Maßnahmen					
ältere Kittungen und Ergänzungen an Rissen und Fehlstellen, insbesondere Lagerfugen; Risse teilweise zugeschlämmt; orangefarbene Fassungsrückstände evtl. sekundär (ursprünglich materialsichtig?), vor allem auf Kittungen an Lagerfugen					
Maßnahmebedarf					
Behebung Gründungsschaden (in Vorbereitung)					
Literatur/ Quellen					
/2/ Dehio, Georg: Handbuch der Deutschen Kunstdenkmäler, Stadtkreis Potsdam; Deutscher Kunstverlag München Berlin, 1993					
/7/ Lippold, Katharina: Die Terrakotten von Potsdam-Sanssouci, Magisterarbeit 1994, Humboldt-Universität Berlin					

Abb. 5: Erfassungsbogen Bauterrakotta, Teil 2



Erfassungsbogen Bauterrakotta			Objekt-Nr. S 1.1.2	Blatt-Nr. 3/3
			Bearbeiter:	S. Wallasch
			Datum:	02-10.2004
Lokalisierung und Objektangaben				
Ort:	Potsdam	Kreis:	Potsdam-Stadt	Reg.-Bezirk:
Objekt:	Satyrmaske; zugehörig Objekt-Nr. S 1.1.1 und S 1.1.3			
Standort:	Park Sanssouci, Römische Bäder, Große Laube			
Entstehungsjahr:	1834	Inventar-Nr.:	Skulpt.sl.g. 58/59	Katalog-Nr.:
Versetzjahr:	1834 (?)	Eigentümer:	Stiftung Preußische Schlösser und Gärten	
Entwurf:	k.A.	Ausführung:	C. Gormann	
Fotos				
				
Foto 2: Satyrmaske in Rebenkranz [Bild-Nr. d032.jpg]		Foto 3: Schalenbildung an Behautmasse [Bild-Nr. d041.jpg]		
Foto 4: [Bild-Nr.]		Foto 5: [Bild-Nr.]		

Abb. 6: Erfassungsbogen Bauterrakotta, Teil 3

2.3 Bestandserfassung Terrakottaamphoren Neue Orangerie¹⁰

Für die spätere Umsetzung modellhafter Restaurierungsmaßnahmen an ausgewählten Amphoren der Neuen Orangerie machte sich eine differenzierte Erfassung des gesamten Amphorenprogramms erforderlich, um aus der Art, dem Umfang und der Lokalisierung der Schadbilder repräsentative Objekte für Untersuchung und Restaurierung auszuwählen.

Im Vorfeld wurden dazu von ROETTGER (2005) bauhistorische Recherchen durchgeführt, um evtl. Standplatzänderungen der Amphoren, damit veränderte Expositionsbedingungen etc. auszumachen.¹¹



Abb. 7: Potsdam, Neue Orangerie, Südansicht, um 1930



Abb. 8: Potsdam, Neue Orangerie, Nordansicht, um 1930

Auf der Attikazone der Neuen Orangerie sind insgesamt 30 Amphoren in-situ erhalten. Zwei weitere Amphoren befinden sich im Depot der SPSG. Alle erkennbaren Standorte sind fortlaufend durchnummeriert, die Amphoren sind ebenfalls fortlaufend nummeriert. Somit ergibt sich für jede Amphore ein Zahlenpaar aus Standort-Nummer und Amphore-Nummer.

Bezüglich der äußeren Gestalt lassen sich nach Aufbau und Dekor verschiedene Typen unterscheiden. Das Dekor als primäres Unterscheidungsmerkmal zeigt sowohl Löwen- als auch Adler-Motive. Sekundäres, technologisches Unterscheidungsmerkmal ist die Ausbildung der Plinthen: einteilige Plinthen aus Terrakotta sowie weiterhin zweiteilige Plinthen, deren unterer Teil aus einer Sandsteinplatte besteht.

Die Schornsteinnähe einiger Amphoren führte zu einer starken Verschwärzung der Oberfläche. In der Regel sind die Nord- und Ostseiten der Vasen stärker von Verschwärzung und biogenem Bewuchs betroffen, als die nach Süden gewandte Seite. Der Versatz war bei den Vasen ohne bzw. mit loseem Deckel einsehbar. In den meisten Fällen wurde ein Ziegel in ca. 5 cm hohem Mörtel gefunden. Alle Vasen wurden mit zwei nichtrostenden Metallklammern auf dem Dach verankert. Stets ließen sich unmittelbar daneben Rostspuren älterer Klammern erkennen.

Die gravierendsten Schäden sind Risse, wobei zwischen klaffenden und nicht klaffenden Rissen unterschieden wurde. Die klaffenden Risse tragen das meiste Gefährdungspotential in sich. Die nicht klaffenden Risse zeigten teilweise weiße Ausblühungen. Fehlende Vasendeckel als Ursache von Wasser- und Schmutzeintrag wurden ebenso als Risikofaktor bewertet. Tatsächlich konnte aber kein unmittelbarer Zusammenhang von starker Schadensausprägung und fehlenden Deckeln erkannt werden. Bei den oberflächlichen Verschmutzungen handelte es sich hauptsächlich um schwarze Ablagerung und nur in geringem Maße um biogenen Bewuchs. Fugenschäden waren nur bei einigen Vasen als Schadbild relevant, da die Vasenteile zum Teil mit Pressfugen ohne Fugenmörtel versetzt wurden. Zwei Vasen stehen nicht im Lot. (Nr.10, 14). Es gibt absturzgefährdete Fehlstellenergänzungen bei zwei der Amphoren. (Nr. 14, 28).

Die Einstufung des Handlungsbedarfs erfolgte nach drei Kategorien: dringend, mittel und gering. Der Handlungsbedarf wurde als **dringend** bewertet, wenn zahlreiche offene Risse die Standsicherheit der Amphore gefährden und durch Absturz von Teilen Personengefährdung zu befürchten ist. Es wurden sieben Amphoren als "dringend" eingestuft, sie befinden sich aber nicht auf der vom Publikumsverkehr am meisten frequentierten Südfassade, sondern sind verteilt über die anderen Gebäudeseiten. Der Hand-

¹⁰ Hunger, Pfeifruck (2006) Bestandserfassung Terrakottaamphoren der Neuen Orangerie

¹¹ Röttger (2005) Archivalienrecherche

lungsbedarf wurde als **mittelfristig** bewertet, wenn bei einer geringen Anzahl offener Risse die Standsicherheit vorerst gewährleistet ist, in Zukunft aber größere Schäden zu befürchten sind. Amphoren dieser Schadensklasse befinden sich recht gleichmäßig über alle Gebäudeseiten verteilt, 13 Objekte insgesamt. Der Handlungsbedarf wurde als **gering** bewertet, wenn keine offenen Risse zu erkennen waren und eine Restaurierung hauptsächlich aus Reinigung und Formergänzung bestehen würde. Es wurden sieben Objekte in diese Kategorie eingestuft. Bis auf eine befinden sich alle Amphoren auf der am meisten frequentierten Südseite.

Die folgende Tabelle und Standplatzübersicht faßt die Ergebnisse sowohl der Schadenserfassung als auch des daraus abgeleiteten Handlungsbedarfs zusammen. Im Ergebnis dieser Bestandsaufnahme wurden 5 vor allem in ihrer Standsicherheit gefährdete Amphoren für die spätere Restaurierung in Umsetzung der Projektergebnisse ausgewählt.

Amphore Nr.	Standort Nr.	Plinthe		Dekor		Henkel		Handlungsbedarf		
		einteilig	zweiteilig	Löwe	Adler	klein	groß	dringend	mittelfristig	gering
1	2	x		x			x			
2	3	x			x		x			
3	4	x		x			x			
4	8	x			x		x			
5	9	x			x		x			
6	12	x		x			x			
7	15	x		x			x			
8	16	x			x		x			
9	17	x		x			x			
10	19		x		x	x				
11	20		x	x			x			
12	21		x		x		x			
13	22	x		x			x			
14	23		x		x		x			
15	28		x	x			x			
16	31	x			x		x			
17	34	x		x			x			
18	35		x		x		x			
19	41	x			x		x			
20	42	x		x			x			
21	43	x		x			x			
22	44		x	x			x			
23	46		x		x	x				
24	48		x	x			x			
25	49		x		x		x			
26	52	x		x			x			
27	54		x	x			x			
28	55		x		x	x				
29	56		x	x			x			
30	57		x		x	x				
31	Depot der Stiftung PSuG	x		x			x			
32	Depot der Stiftung PSuG	x			x		x			

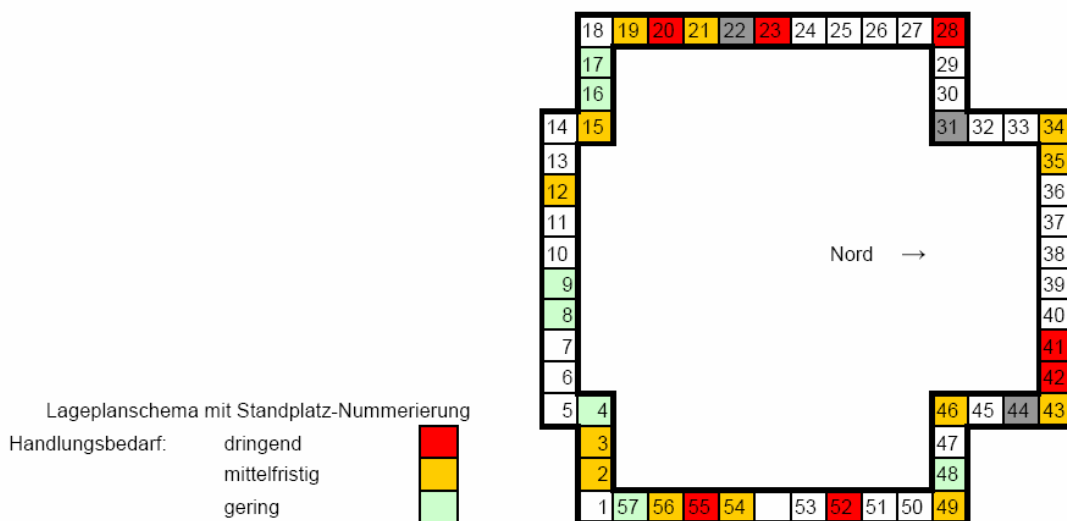


Abb. 9: Standplatzübersicht Amphoren und Restaurierungsbedarf

Jede Amphore wurde dabei anhand des nachfolgend wiedergegebenen Erfassungsbogens dokumentiert.


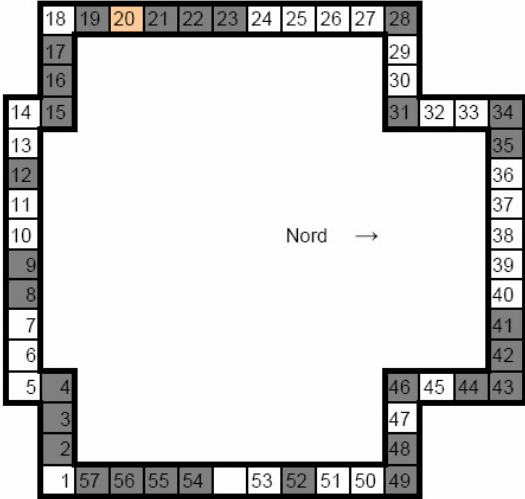
Terrakottaamphoren vom Dach des Orangerieschlusses, Potsdam Park Sanssouci		Seite 29					
Ausführung: E. March & Söhne, um 1861							
Eigentümer: Stiftung Preußische Schlösser und Gärten							
Erfassungsbogen		Bearbeiter: S. Hunger / J. Pfeifruck					
Amphore Nr.: 11	Standort Nr.: 20	Datum: 14.07.2005					
Gesamtansicht:		Lageplanschema mit Standplatz-Nummerierung:					
		 <p style="text-align: center;">Nord →</p>					
		<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> Standplätze von Amphoren Standplatz der abgebildeten Amphore </div>					
Objektbeschreibung:							
Amphore Nr.:	11	Plinthe:	einteilig, Terrakotta: <input type="checkbox"/>				
Standort Nr.:	20		zweiteilig, Sandsteinbasis: <input checked="" type="checkbox"/>				
Gebäudeseite:	West	Dekorart:	Löwenmotiv: <input checked="" type="checkbox"/> ausladende Henkel <input checked="" type="checkbox"/>				
Maße (H x D max):	121 x 67 cm		Adlermotiv: <input type="checkbox"/> kleinere Henkel <input type="checkbox"/>				
Standort:							
	Schornsteinnähe:	<input type="checkbox"/>					
	sonstiges:						
Versatz:							
	nicht einsehbar:	<input checked="" type="checkbox"/>					
	Ziegel als Armierung im Versetzmörtel:	<input type="checkbox"/>					
	Höhe des Mörtels:						
Verankerung:							
	2 Metallklammern am Fuß:	<input checked="" type="checkbox"/>					
	Rostspuren früherer Eisenklammern:	<input checked="" type="checkbox"/>					
Schäden:							
Risse:	Risse, aufklaffend	zahlreich	einige	<input checked="" type="checkbox"/>	wenige	keine	
	Risse, nicht aufklaffend	zahlreich	einige	<input checked="" type="checkbox"/>	wenige	keine	
Fehlstellen:	fehlender Originaldeckel:	<input type="checkbox"/>		Ersatzdeckel vorhanden:		<input type="checkbox"/>	
	fehlender Deckelknopf:	<input type="checkbox"/>					
	formale Fehlstellen:	zahlreich	einige	<input type="checkbox"/>	wenige	keine	<input checked="" type="checkbox"/>
	sonstiges:	große Mörtelergänzung an Fehlstelle in der Deckelauflage					
Verschmutzung:							
	geschwärzte Oberfläche	großflächig	bereichsweise	<input checked="" type="checkbox"/>	lokal		
	Lokalisierung:						
	biogener Bewuchs	großflächig	bereichsweise	<input checked="" type="checkbox"/>	lokal		
	Lokalisierung:	Nordseite					
Fugenschäden:							
	Fuge Fuß-Rumpf	zahlreich	<input checked="" type="checkbox"/>	einige	<input type="checkbox"/>	keine	entfällt
	Deckelfuge:	zahlreich	<input checked="" type="checkbox"/>	einige	<input type="checkbox"/>	keine	entfällt
Kurztext:							
Die offenen Risse im Fuß verlaufen durchgehend bis in den Rumpf. An der schmalsten Stelle des Fußes gibt es eine umlaufende gekittete Fuge, die einen alten Bruch vermuten läßt. Ein Riss verläuft durch einen Henkel. Der Deckel ist gebrochen und mit einer Mörtelergänzung versehen.							
Die Oberfläche weist starke lokale Unterschiede im Grad der Verschwärzung auf. Eine Zuordnung nach Himmelsrichtungen läßt sich nicht vornehmen. Ein früherer Ortswechsel kann vermutet werden.							
Dringender Handlungsbedarf aufgrund der zahlreichen Risse und möglicherweise unstabiler Altklebung.							
Handlungsbedarf:							
	dringend	<input checked="" type="checkbox"/>	mittelfristig	<input type="checkbox"/>	gering	<input type="checkbox"/>	

Abb. 10: Erfassungsbogen zum Objektzustand

Terrakottaamphoren vom Dach des Orangerieschlosses, Potsdam Park Sanssouci
 Ausführung: E. March & Söhne, um 1861
 Eigentümer: Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Seite 30

Erfassungsbogen		Bearbeiter: S. Hunger / J. Pfeifruck
Amphore Nr:	11 Standort Nr: 20	Datum 14.07.2005

Detailfotos:



Erläuterung: offene und geschlossene Risse am Fuß, teils gekittet



Erläuterung: Risskittung am Fuß



Erläuterung: zahlreiche Risse im Bereich des Henkels



Erläuterung: defekter, mehrfach gesprungener Deckel

Abb. 11: Ausgewählte Schadbilder

2.4 Zusammenfassung

In Auswertung der Inventare WALLASCH (2004) und HUNGER/PFEIFRUCK (2006) können folgende Schlußfolgerungen gezogen werden, die eine Einteilung des Potsdamer Terrakottabestandes in folgende Keramiktypen gestattet.

Vorschlag zu Einteilung des Terrakottabestandes nach Keramiktypen:

Keramiktyp	Masse und Scherben (Tendenz)	Oberflächenmerkmale (Tendenz)
„Römisches Bad“ <ul style="list-style-type: none"> ▪ Früheste Terrakotten Park Sanssouci ▪ (Römisches Bad und Komplex Friedenskirche, weitere) ▪ Datierung 1834 bis ca. 1837 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ fein geschlämmter Ziegelton ▪ orangeroter Scherben ▪ Schamotteanteile ▪ Behautmasse an Plastiken ▪ Brenntemperatur kaum über 1060 °C ▪ Teilweise Schwachbrand 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schalenbildung Behautmasse ▪ Gipskrusten
„Babelsberg“ <ul style="list-style-type: none"> ▪ vor allem Formsteinfriese von March ▪ (vor allem Bauten Park Babelsberg) ▪ Datierung 1842 bis ca. 1849 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gelblicher Scherben durch höheren Kalkanteil im Ziegelton, ▪ Fehlende Schamotteanteile ▪ Fehlende Behautmasse 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gipskrusten
„Neue Orangerie“ <ul style="list-style-type: none"> ▪ (Neue Orangerie, Kinderbrunnen, Vasen an Pförtner- und Küsterhaus, weitere) ▪ Datierung 1850 bis ca. 1879 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Steinzeugähnlicher Scherben, Druckfestigkeit hoch (über 40 N/mm²) ▪ Brenntemperatur über 1200 °C (Quelle GRZIMEK¹²) ▪ Fehlende Schamotteanteile ▪ Fehlende Behautmasse 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ „thin-black-layers“ ▪ silikatische Krusten ▪ Schwind- und Brennrisse häufiger

In Auswertung dieser Erhebungen konnten somit von den erfaßten Terrakottaobjekten in einer späteren Projektphase gezielt Referenzproben entnommen werden, um durch vor allem mikroskopische Untersuchungen den keramtechnischen Vergleich zur Hauptgruppe der Amphoren der Neuen Orangerie herzustellen.

3 Materialkundliche und bauklimatische Untersuchungen verschiedener Bestandsgruppen

3.1 Mikroskopische Untersuchungen zur Zustandserfassung des Terrakottabestandes Park Sanssouci¹³

3.1.1 Vorbemerkungen

Ausgehend vom Material- und Schadenskataster WALLASCH (2004)¹⁴ wurde ein Beprobungs- und Untersuchungsplan entwickelt, der sowohl den verschiedenen Keramiktypen einerseits also auch andererseits den verschiedenen Verwitterungsphänomenen Rechnung tragen sollte. Gleichzeitig sollte die Repräsentanz der Terrakottaobjekte ermittelt werden, die für die Laboruntersuchungen zur Reinigungsproblematik in den Werkstätten der FH Potsdam genutzt wurden.

Untersucht wurden Terrakottaelemente von folgenden Objekten im Park Sanssouci:

- Terrakotten Römische Bäder
- Kinderbrunnen der Baldachinfontäne
- Kreuzgang der Friedenskirche
- Heilsbronner Portal (Formstein)
- Campanile der Friedenskirche (Depotstück)

¹² Grzimek (2006) Keramische Betrachtungen zu den Terrakotten Potsdam Sanssouci

¹³ Schlütter (2006) Mikroskopische Untersuchungen ausgewählter Terrakottaobjekte

¹⁴ Wallasch (2005) Material- und Schadenskataster

Soweit möglich erfolgte eine Beschränkung auf lockere Krustenbestandteile bzw. kleine Terrakottastücke. In Ausnahmefällen wurden mit Hilfe einer Minitrennscheibe kleine Stücke aus Randbereichen von Fehlstellen entnommen.

Übersicht über entnommene Terrakotta- und Formsteinproben von Objekten im Park Sanssouci:

Objekt	Bezeichnung	Entnahmestelle	Materialbeschreibung	Fragestellung
Terrakotten Römische Bäder [Inv.-Nr. SPSG: 58/59]	S 1.1.3/1	Bacchantengelage	Rötliche Keramik mit schwarzer Oberfläche (eventuell nur Behautmasse)	- Identifizierung der Verschwärzung - Gefügeveränderungen
	S 1.1.3/2	Bacchantengelage	Graue Schmutzschicht (Kruste)	- Identifizierung der Schmutzschicht
	S 1.1.2/1	Satyrmaske	Rötliche Keramik mit schwarzer Oberfläche (eventuell nur Behautmasse)	- Identifizierung der Verschwärzung - Gefügeveränderungen
	S 1.1.2/2	Satyrmaske	Graue Schmutzschicht (Kruste)	- Identifizierung der Schmutzschicht
	S 1.1.1/1	Panmaske	Graue Schmutzschicht (Kruste)	- Identifizierung der Schmutzschicht
Kinderbrunnen der Baldachin- fontäne [Inv.-Nr. SPSG: 318]	S 2.1/1	Gewandfalte	Schwarze Schmutzschicht (evtl. Fassung)	- Identifizierung Schmutzschicht / Fassung
	S 2.1/2	Bein (linker Oberschenkel)	Graue Schmutzschicht (evtl. Fassung)	- Identifizierung Schmutzschicht / Fassung
Kreuzgang der Friedenskirche	S 3.2/1	Säulenbasis	Gelbliche Keramik mit schwarzer Oberfläche	- Identifizierung der Verschwärzung - Gefügeveränderungen
Heilsbronner Portal	S 3.1/1	Basis der südlichen Taustabsäule	Rötliche Keramik mit schwarzer Oberfläche (ohne Behautmasse), evtl. mit Originaloberfläche	- Identifizierung der Verschwärzung - Gefügeveränderungen
	S 3.1/2	Basis der nördlichen Taustabsäule	Rötliche Keramik mit schwarzer Oberfläche (ohne Behautmasse), rückgewittert, Originaloberfläche nicht mehr erhalten	- Identifizierung der Verschwärzung - Gefügeveränderungen
Campanile der Friedenskirche (Depotstück)	S 3.5/1	Bruchstück eines Säulenkapitells	Beigefarbene Keramik mit schwarzer Oberfläche	Identifizierung der Verschwärzung

3.1.2 Untersuchungsergebnisse

Im folgenden werden für zwei der untersuchten Objekte die Ergebnisse exemplarisch wiedergegeben.

Folgende Fragestellungen waren dabei insgesamt zu bearbeiten:

- Zusammensetzung der Verschwärzungen bzw. Krusten auf Terrakotten
- Beitrag der Verschwärzungen bzw. Krusten zu Schäden an Terrakotten
- Weitere Schadensursachen
- Schlußfolgerungen aus den Untersuchungen für die Konservierung

Terrakotten Römische Bäder:

S 1.1.3/1	Bacchantengelage	Rötliche Keramik mit schwarzer Oberfläche (eventuell nur Behautmasse)	<u>Fragestellung:</u> - Identifizierung der Verschwärzung - Gefügeveränderungen	Abb. 12: bis Abb. 19
------------------	------------------	---	---	-----------------------------

Die auffällige Schwärzung der Oberfläche wird durch eine dünne aufliegende Schmutzschicht verursacht (Schichtdicke <10 µm). Diese Schicht ist gipsfrei, überwiegend organisch gebunden und enthält zahlreiche Fe- und Pb-haltige Partikel (Oxide und/oder Sulfide). Ursache der schwarzen Färbung der Auflage- rung sind die eingeschlossenen dunklen Partikel und möglicherweise auch das organische „Bindemittel“.

Erst bei der Untersuchung des Dünnschliffs im REM wird deutlich, dass der Porenraum unter der ge- schwärzten Oberfläche bis in mindestens 300 µm Tiefe durch die Abscheidung feinkristallinen Gipses verdichtet ist. Die Peakverhältnisse in der EDX-Analyse deuten drauf hin, dass neben Gips zusätzlich Kalk (Calcit) enthalten ist.

Sowohl die Schmutzschicht als auch die Vergipsung sind schadensrelevante Veränderungen, weil durch sie einige für die Dauerhaftigkeit einer Keramik wesentlichen Materialkennwerte (z.B. Porenradienverteilung, Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten) nachteilig verändert werden.

S 1.1.3/2	Bacchantengelage	Graue Schmutzschicht (Kruste)	<u>Fragestellung:</u> - Identifizierung der Schmutzschicht	Abb. 20: bis Abb. 26:
------------------	------------------	-------------------------------	---	------------------------------

Die Verkrustung wurde mit dem Skalpell als dünne Schale abgehoben. Aus den mikroskopischen Unter- suchungen ist ersichtlich, daß es sich um eine Gipskruste handelt, die von zahlreichen gelblich- bräunlichen, eisenoxid/hydroxidhaltigen Partikeln sowie von dunkelgrauen bis schwarzen, opaken Parti- keln durchsetzt ist. Diese Bestandteile sind für Gipskrusten typisch.

Im hinteren, der Terrakottaoberfläche zugewandeten Bereich der Kruste sind Terrakottapartikel einge- schlossen. Hieraus ist zu schließen, dass die Krustenbildung mit einer Schädigung der Keramik einher- geht. Aus dem mikroskopischen Erscheinungsbild ist auf eine Mürbzone unter der Kruste zu schließen. Auch eine Vergipsung des Porenraumes der Terrakotta unter der Kruste ist wahrscheinlich.



Übersicht

(Bacchantengelage)

Abb. 12:

Terrakottafries im Komplex der Römischen Bädern im Park Sanssouci: Bacchantengelage. Übersichtsaufnahme.

Detailaufnahmen:

Unterer Rahmen: Abb. 13

Oberer Rahmen: Abb. 20



Probe S 1.1.3/1

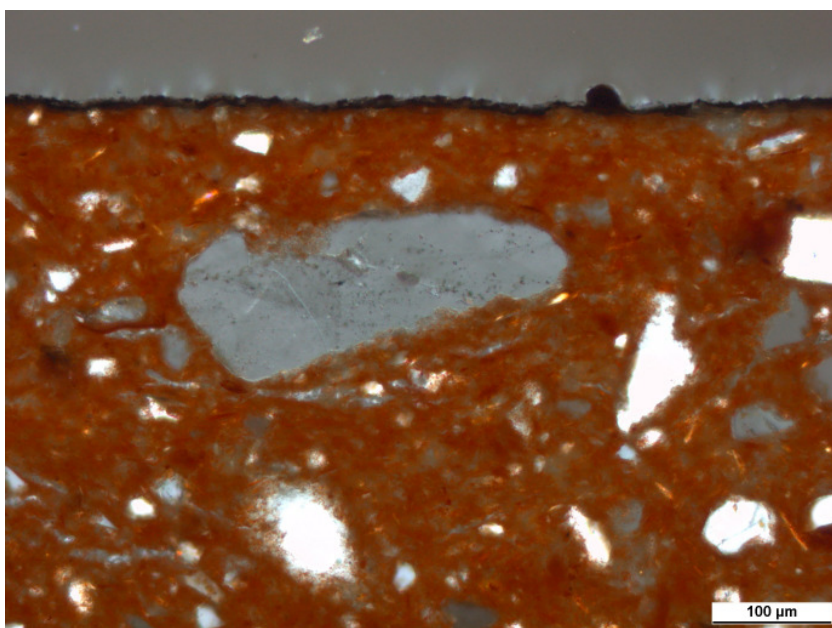
(Bacchantengelage)

Abb. 13:

Detail aus Abb. 12.

Schadensbild: Ablösung einer 2-3 mm dicken Schale. Merkmale dieser Schalen sind ihre relativ gleichmäßige Dicke und die geschwärzte Oberfläche.

Die Probe wurde aus dem Randbereich der Fehlstelle entnommen.



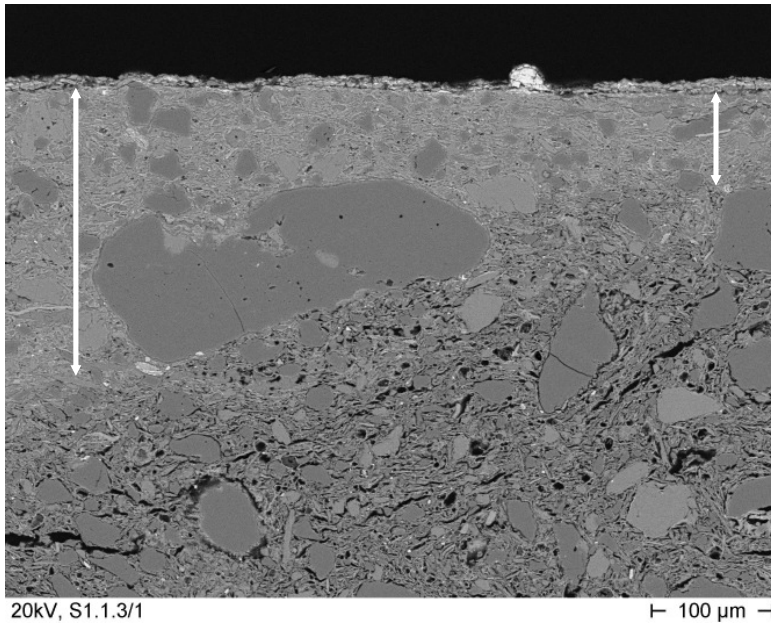
Probe S 1.1.3/1

(Bacchantengelage)

Abb. 14:

Schale mit geschwärzter Oberfläche im Querschnitt. Lichtmikroskopisch ist keine Vergipsung zu erkennen.

[PolMi-Aufnahme, + Polarisatoren]

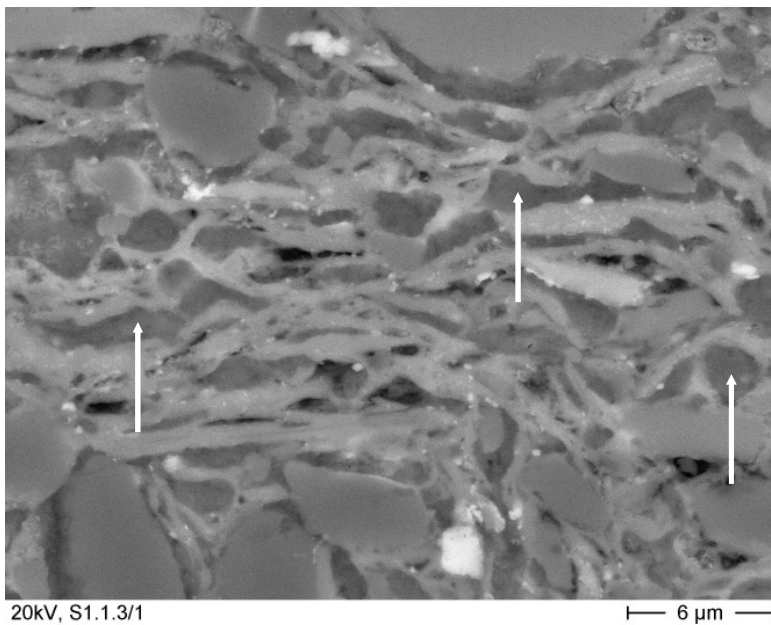


Probe **S 1.1.3/1**
(Bacchantengelage)

Abb. 15:

Gleicher Probenbereich wie Abb. 14 in der REM-RE-Darstellung. Im markierten Abschnitt (unmittelbar unter der Oberfläche) ist der Porenraum durch Abscheidung feinkristallinen Gipses verdichtet.

[REM-RE-Aufnahme am Dünnschliff]



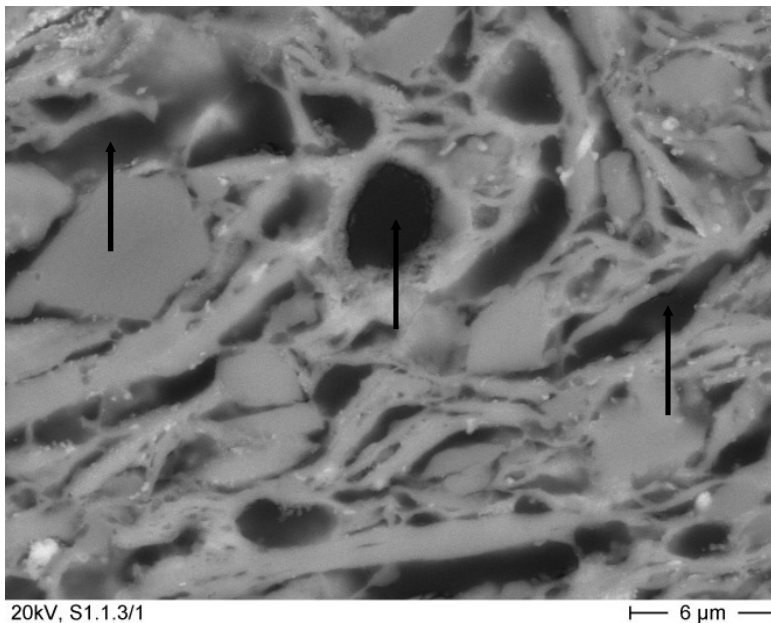
Probe **S 1.1.3/1**
(Bacchantengelage)

Abb. 16:

Detail aus dem in Abb. 15 markierten Bereich. Der Porenraum der Terrakotta ist mit Gips gefüllt (Pfeilmarkierungen).

Der unveränderte Porenraum ist in Abb. 17 dargestellt.

[REM-RE-Aufnahme am Dünnschliff]



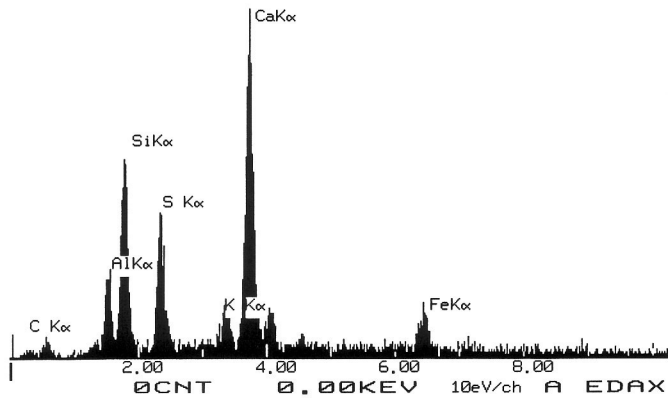
Probe **S 1.1.3/1**
(Bacchantengelage)

Abb. 17:

Unveränderter Porenraum der Terrakotta (Detail aus Abb. 15, Gefügeabschnitt unterhalb der Markierung). Die Pfeile markieren das bei der Dünnschliffherstellung in den Porenraum eingedrungene Harz.

[REM-RE-Aufnahme am Dünnschliff]


```
17-NOV-05 03:28:43 EDAX READY  
RATE= 0CPS TIME= 50LSEC  
FS= 317CNT PRST= OFF  
A =S1.1.1/3 Gips im Porenraum
```



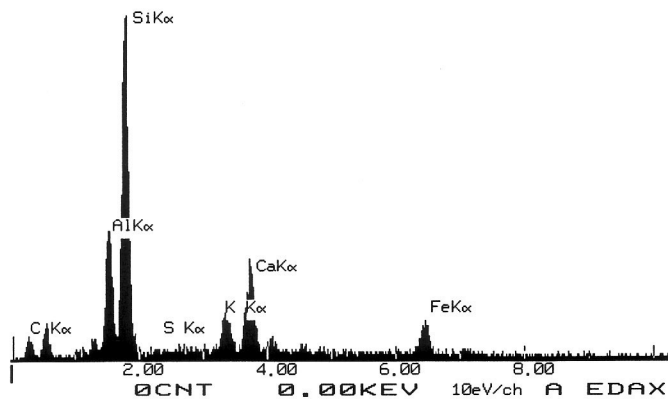
Probe **S 1.1.3/1**
(Bacchantengelage)

Abb. 18:

EDX-Spektrum, aufgenommen integral über den vergipsten Gefügeabschnitt in Abb. 15. Der überproportional hohe Ca-Gehalt deutet darauf hin, dass neben Gips zusätzlich Kalk (Calcit) im Porenraum enthalten ist.

[EDX-Analyse]

```
17-NOV-05 03:30:06 EDAX READY  
RATE= 2CPS TIME= 63LSEC  
FS= 590CNT PRST= OFF  
A =S1.1.1/3 Terrakotta o. Gips
```



Probe **S 1.1.3/1**
(Bacchantengelage)

Abb. 19:

EDX-Spektrum, aufgenommen integral über den nicht vergipsten Gefügeabschnitt in Abb. 17. Die Peakverhältnisse sind typisch für Terrakotta.

[EDX-Analyse]

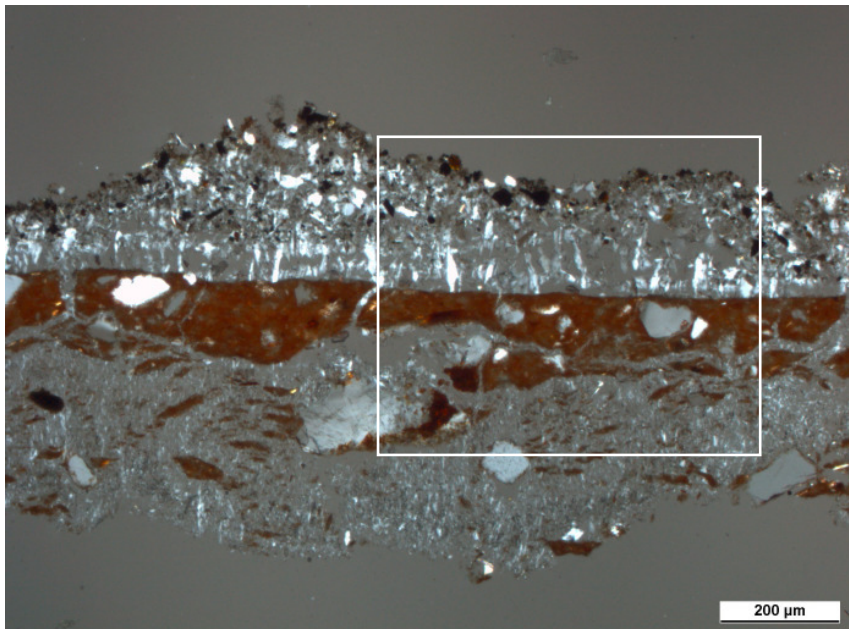


Probe **S 1.1.3/2**
(Bacchantengelage)

Abb. 20:

Detail aus Abb. 12.
Typische Verkrustungen in geschützten Bereichen des Bacchantengelages.

Für die Untersuchung wurde mit einem Skalpell ein Stück Kruste entnommen.

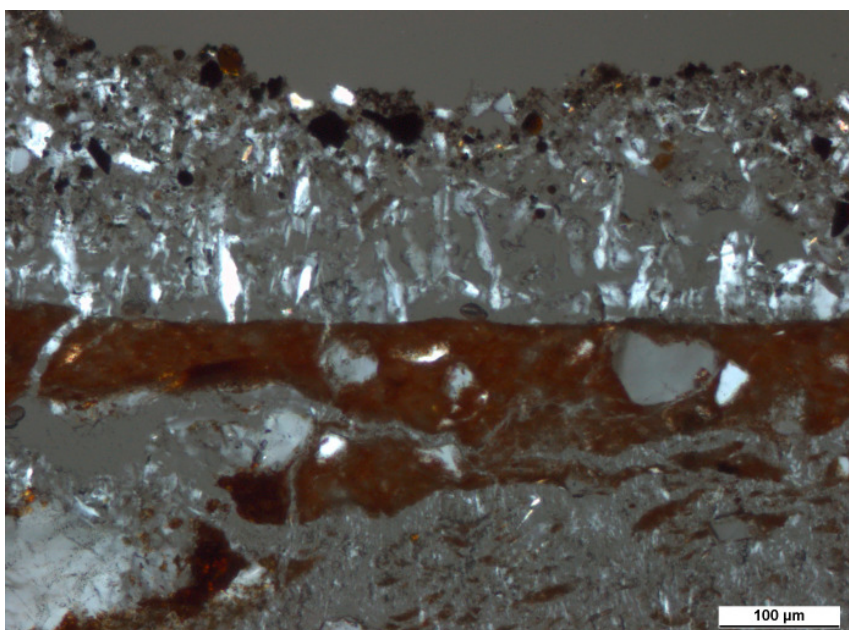


Probe **S 1.1.3/2**
(Bacchantengelage)

Abb. 21:

Übersicht. Kruste im Querschnitt.
Es ist zu erkennen, dass Terrakottapartikel in der Gipsschicht eingeschlossen sind. Hieraus ist ersichtlich, dass die Keramik unter der Kruste geschädigt ist.

[PolMi-Aufnahme, + Polarisatoren]

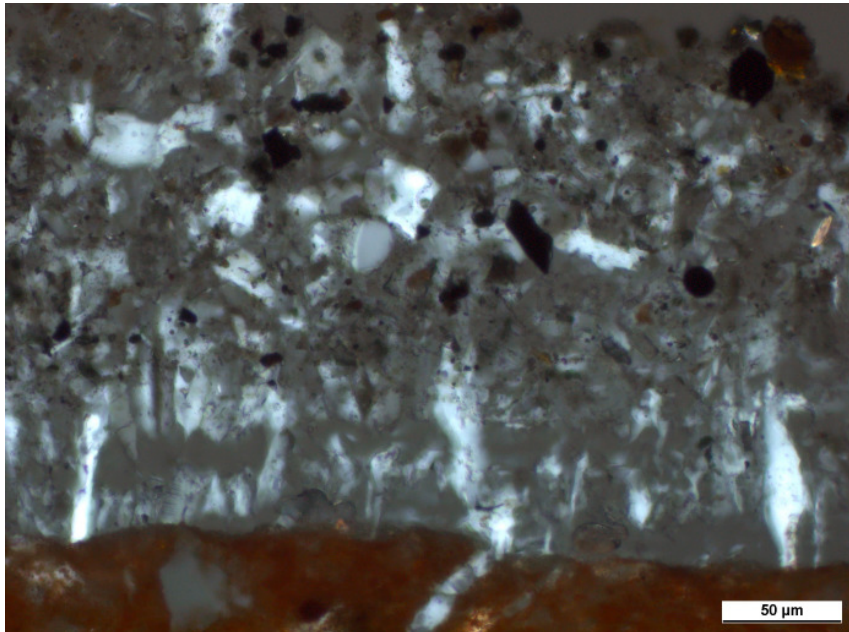


Probe **S 1.1.3/2**
(Bacchantengelage)

Abb. 22:

Detail (Rahmen) aus Abb. 21.

[PolMi-Aufnahme, + Polarisatoren]

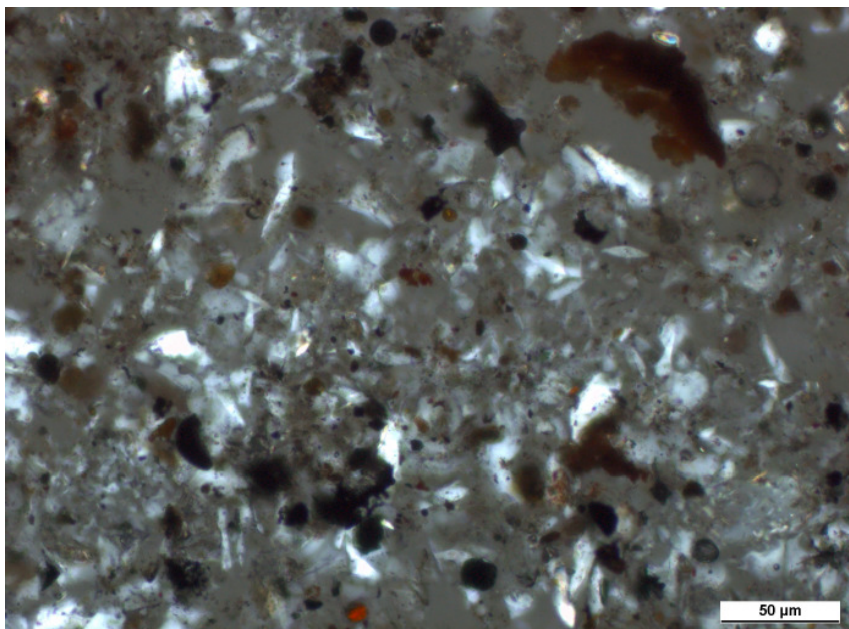


Probe **S 1.1.3/2**
(Bacchantengelage)

Abb. 23:

Kontaktzone Terrakotta/Kruste bei höherer Vergrößerung. Die unterschiedlichen Kristallformen und -größen in der Kruste sind zu erkennen.

[PolMi-Aufnahme, + Polarisatoren]



Probe **S 1.1.3/2**
(Bacchantengelage)

Abb. 24:

Detail der Gipskruste mit eingeschlossenen Partikeln. Die dunkelbraunen und schwarzen (opaken) Partikel sind für das schwarze Erscheinungsbild der meisten Gipskrusten verantwortlich.

[PolMi-Aufnahme, + Polarisatore]

Terrakotten des Heilsbronner Portals:

S 3.1/1	Basis der südlichen Taustabsäule	Rötliche Keramik mit schwarzer Oberfläche (ohne Behautmasse), evtl. mit Originaloberfläche	<u>Fragestellung:</u> - Identifizierung der Verschwärzung - Gefügeveränderungen	Abb. 25 bis Abb. 44
----------------	----------------------------------	--	---	----------------------------

Im Gegensatz zur gelblichen Keramik im Kreuzgang der Friedenskirche handelt es sich hier um einen roten Formstein, der aus einem anderen Rohstoff gefertigt wurde. Ein wesentliches Merkmal des untersuchten Formsteins ist die Verwendung von Altziegel als zusätzliche Magerung. Vermutlich wurde hierdurch der geringen Menge an Mineralkörnern im Ton, die zu einer hohen Trocken- und Brennschwindung führen, entgegengewirkt.

Ein weiteres Gefügemerkmal ist die sehr raue Oberfläche mit hervorstehenden Quarzen. Die Originaloberfläche (Brennhaut) ist nicht mehr vorhanden. Die Schwärzung der rückgewitterten Oberfläche wird durch eine aufliegende, dünne schwarze, überwiegend organisch gebundene Schicht verursacht. Die Schichtdicke beträgt meist < 5 µm. Gips ist weder in der Kruste noch im oberflächennahen Porenraum vorhanden und scheidet damit als Schadensursache aus.

Bei der REM-Untersuchung wird deutlich, dass der keramische Scherben zahlreiche Schichtsilikate mit tonmineralähnlichen Strukturen aufweist. Sie sind die Folge einer geringen Sinterung, die wiederum auf eine niedrige Brenntemperatur schließen lässt. Daraus resultiert eine relativ geringe Beständigkeit gegen Frost und gegen Salze.



Probe **S 3.1/1**
Probe **S 3.1/2**
(Heilsbronner Tor)

Abb. 25:

Heilsbronner Tor mit geschädigten Säulenbasen (markiert durch Rahmen), an denen die Proben entnommen wurden

Detailaufnahmen:

Probe S 3.1/1: Abb. 27

Probe S 3.1/2: Abb. 35



Probe **S 3.1/1**
(Heilsbronner Tor,
Basis der südlichen Taustab-
säule)

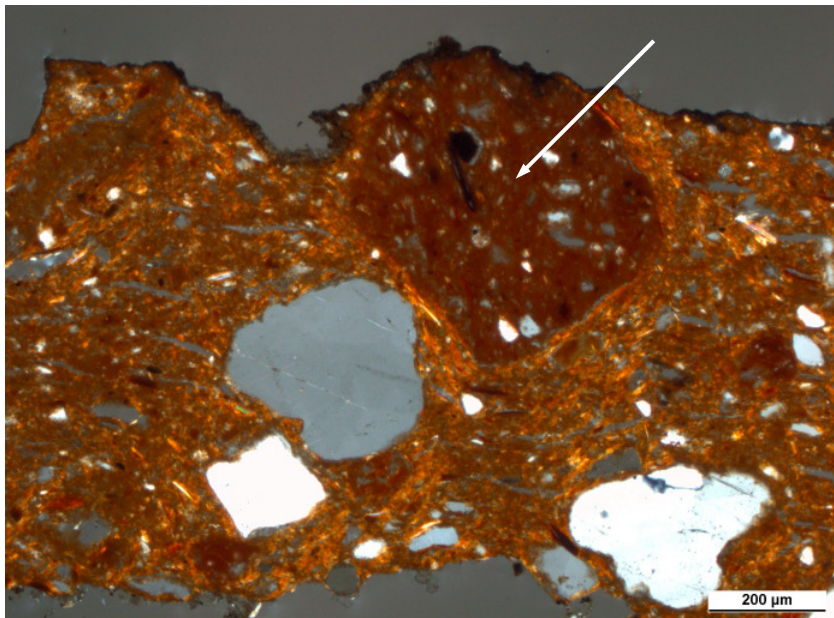
Abb. 26:

Detail (rechter Rahmen) aus
Abb. 25. Entnahmestelle der
Probe.



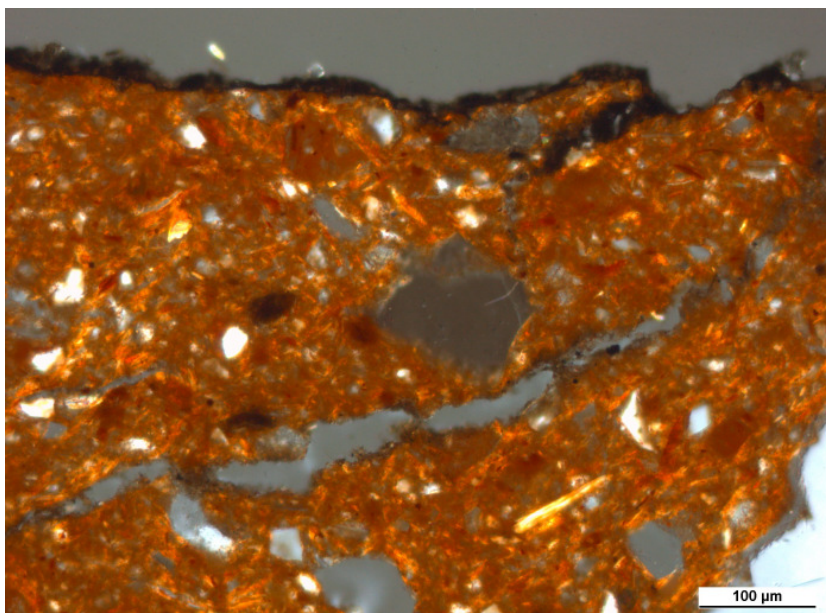
Probe **S 3.1/1**
(Heilsbronner Tor,
Basis der südlichen Taustabsäule)

Abb. 27:
Detail (Rahmen) aus Abb. 25.



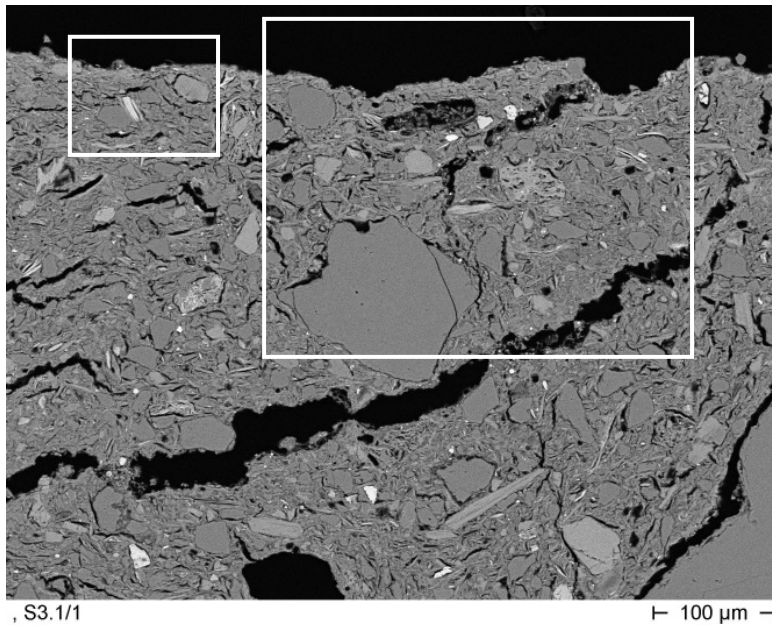
Probe **S 3.1/1**
(Heilsbronner Tor,
Basis der südlichen Taustabsäule)

Abb. 28:
Es handelt sich um einen mineral-
kornarmen Scherben, dem Ziegel-
bruch als Magerungskomponente
(Markierung) zugegeben wurde.
Die Originaloberfläche (Brennhaut)
ist nicht mehr vorhanden.
[PolMi-Aufnahme, + Polarisatoren]



Probe **S 3.1/1**
(Heilsbronner Tor,
Basis der südlichen Taustabsäule)

Abb. 29:
Keramik mit geschädigter, ge-
schwärzter Oberfläche im Quer-
schnitt. Es ist eine größere längli-
che Pore (Hohlraum) zu erkennen.
Risse oder Salze sind nicht vor-
handen.
[PolMi-Aufnahme, + Polarisatoren]

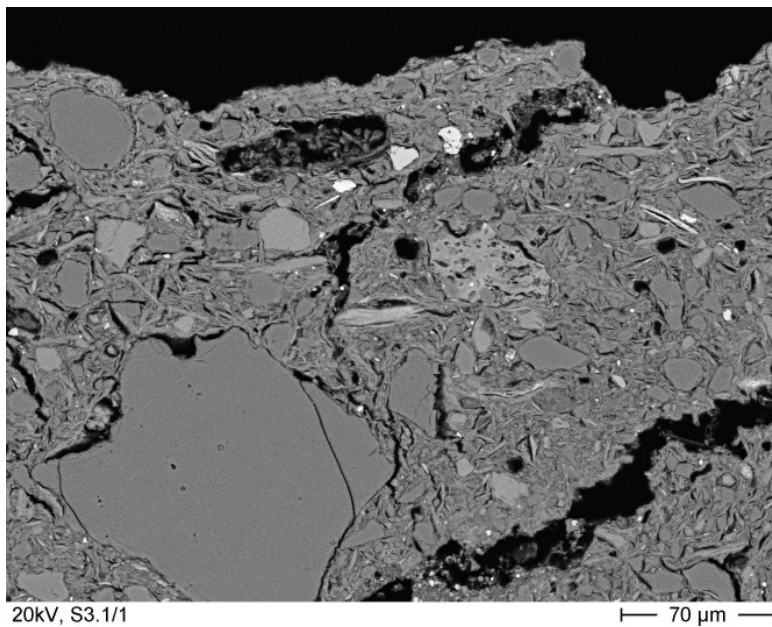


Probe **S 3.1/1**
(Heilsbronner Tor,
Basis der südlichen Taustabsäule)

Abb. 30:

Gleicher Probenbereich wie Abb. 29 in der REM-RE-Darstellung. Die vorhandenen länglichen Poren sind keine Risse sind herstellungsbedingte Porenformen. Gefügeverdichtungen durch Gips sind nicht vorhanden.

[REM-RE-Aufnahme am Dünnschliff]

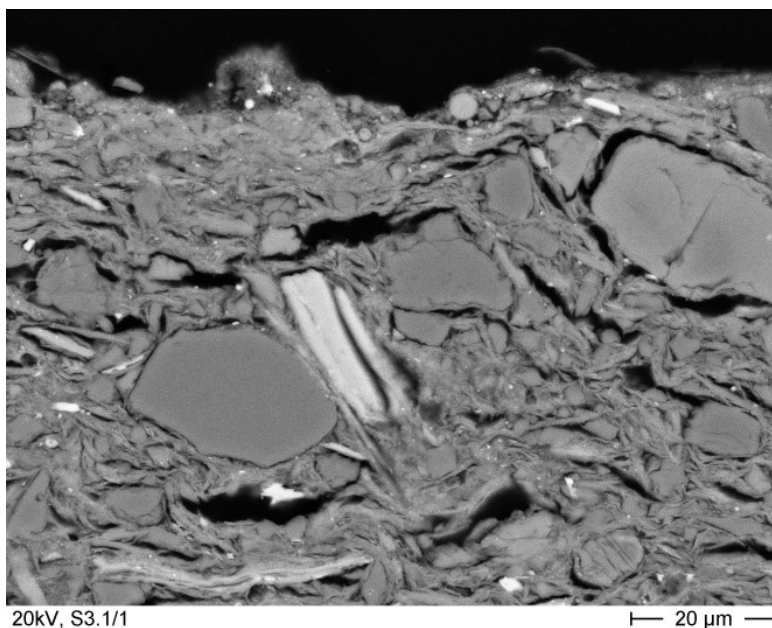


Probe **S 3.1/1**
(Heilsbronner Tor,
Basis der südlichen Taustabsäule)

Abb. 31:

1. Detail (großer Rahmen) aus Abb. 30. Der Porenraum ist salzfrei.

[REM-RE-Aufnahme am Dünnschliff]

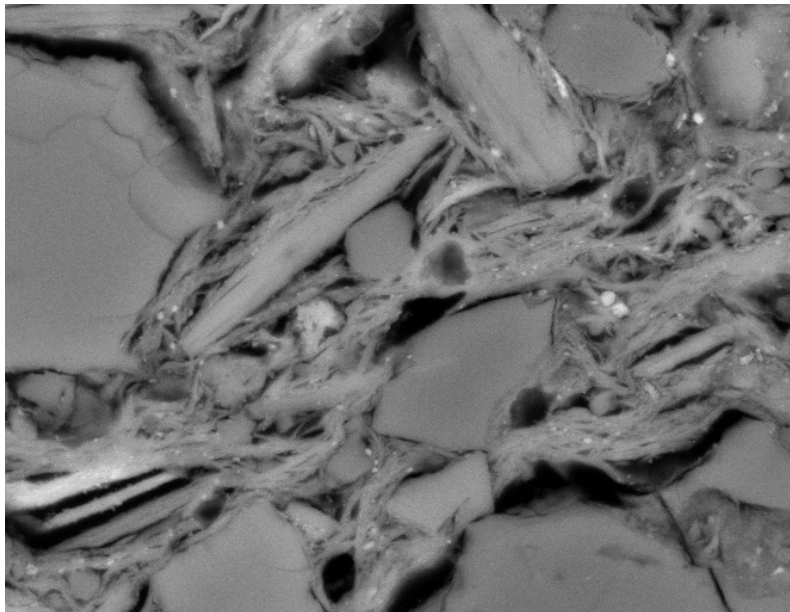


Probe **S 3.1/1**
(Heilsbronner Tor,
Basis der südlichen Taustabsäule)

Abb. 32:

2. Detail (kleiner Rahmen) aus Abb. 30. Der Porenraum ist salzfrei.

[REM-RE-Aufnahme am Dünnschliff]



20kV, S3.1/1

6 µm

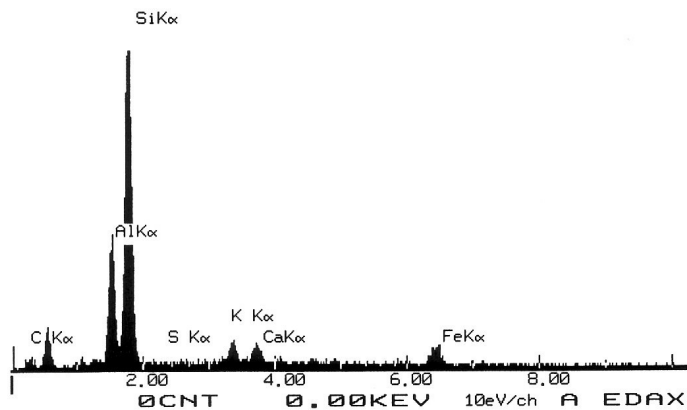
Probe **S 3.1/1**
(Heilsbronner Tor,
Basis der südlichen Taustabsäule)

Abb. 33:

Keramischer Scherben bei höherer Vergrößerung. Die blättchenförmigen Strukturen sind die Folge einer unvollständigen Sinterung des Rohstoffs und deuten auf eine niedrige Brenntemperatur bzw. zu kurze Brenndauer.

[REM-RE-Aufnahme am Dünnschliff]

```
17-NOV-05 03:36:13 EDAX READY
RATE= 2CPS TIME= 64LSEC
FS= 951CNT PRST= OFF
A =S3.1/1 Terrakotta
```



Probe **S 3.1/1**
(Heilsbronner Tor,
Basis der südlichen Taustabsäule)

Abb. 34:

Elementzusammensetzung, aufgenommen an den blättchenförmigen Strukturen in Abb. 33. Es handelt sich um einen für bestimmte Tonminerale typischen Elementbestand.

[EDX-Analyse]



Probe **S 3.1/1**
(Heilsbronner Tor,
Basis der nördlichen Taustab-
säule)

Abb. 35:
Detail (linker Rahmen) in Abb.
25.



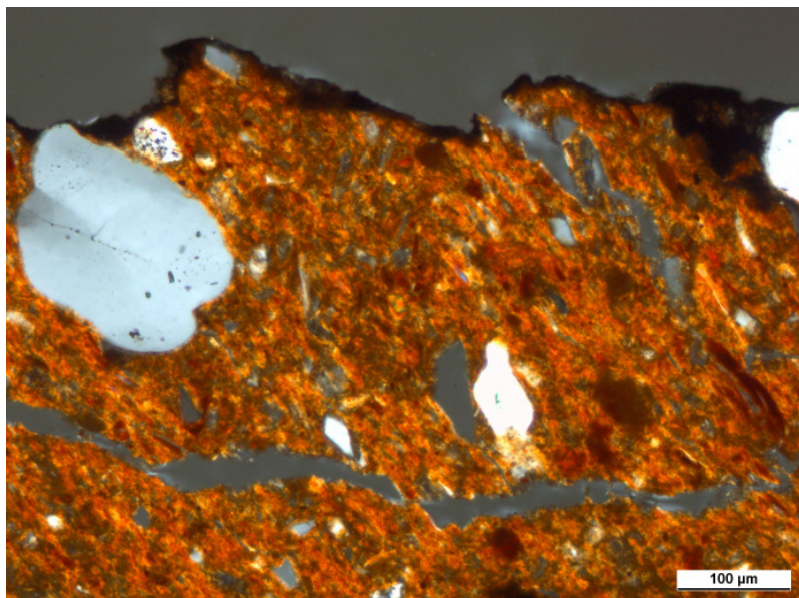
Probe **S 3.1/1**
(Heilsbronner Tor,
Basis der nördlichen Taustab-
säule)

Abb. 36:
Detail (Rahmen) aus Abb. 35.
Probenentnahmestelle.



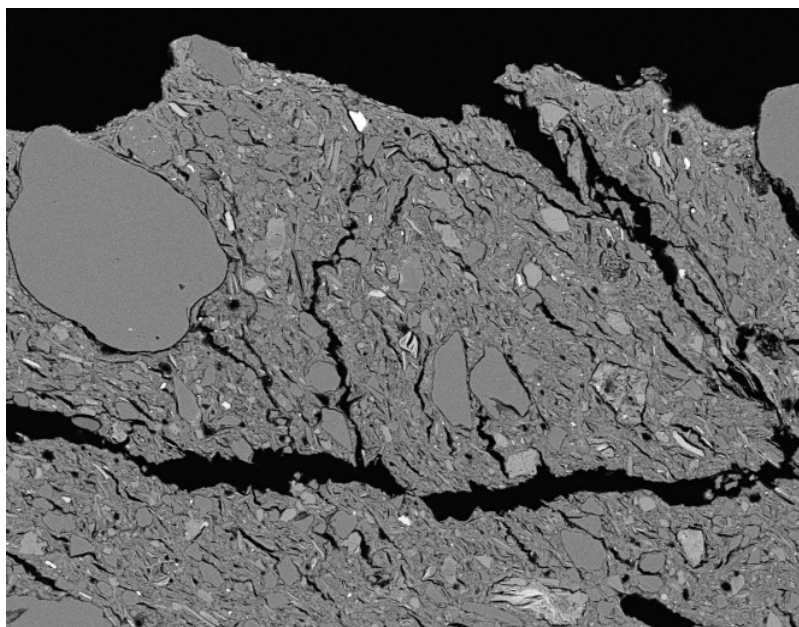
Probe **S 3.1/1**
(Heilsbronner Tor,
Basis der nördlichen Taustab-
säule)

Abb. 37:
Detail (Rahmen) aus Abb. 36.



Probe **S 3.1/1**
(Heilsbronner Tor,
Basis der nördlichen Taustabsäule)

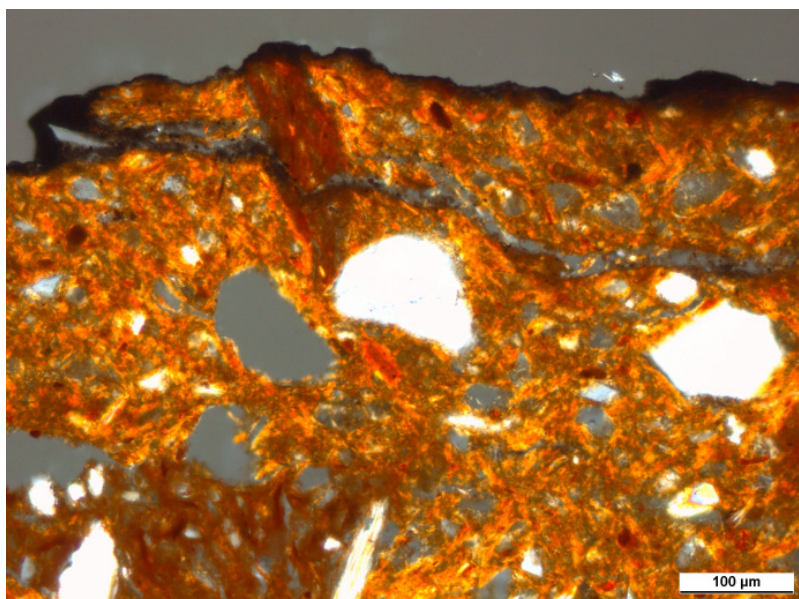
Abb. 38:
Geschädigte Keramik (Risse erkennbar) mit geschwärzter Oberfläche.
[PolMi-Aufnahme, + Polarisatoren]



Probe **S 3.1/1**
(Heilsbronner Tor,
Basis der nördlichen Taustabsäule)

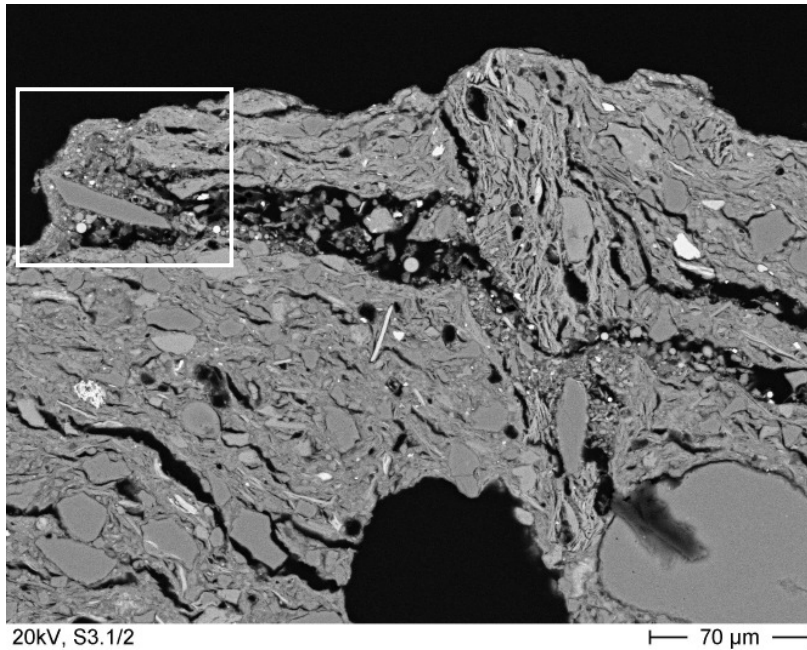
Abb. 39:
Gleicher Bildbereich wie Abb. 38 in der REM-Darstellung. Die Risse sind deutlicher zu erkennen. In den Rissen befindet sich kein Gips.
[REM-RE-Aufnahme am Dünnschliff]

20kV, S3.1/2 100 µm



Probe **S 3.1/1**
(Heilsbronner Tor,
Basis der nördlichen Taustabsäule)

Abb. 40:
Geschädigte Keramik (Risse erkennbar) mit geschwärzter Oberfläche (andere Probenstelle als Abb. 38). Die Ergebnisse der Untersuchung des stark geschwärzten Bereiches in der oberen linken Bildecke werden in den folgenden Abb. detailliert beschrieben.
[PolMi-Aufnahme, + Polarisatoren]



Probe **S 3.1/1**
(Heilsbronner Tor,
Basis der nördlichen Taustabsäule)

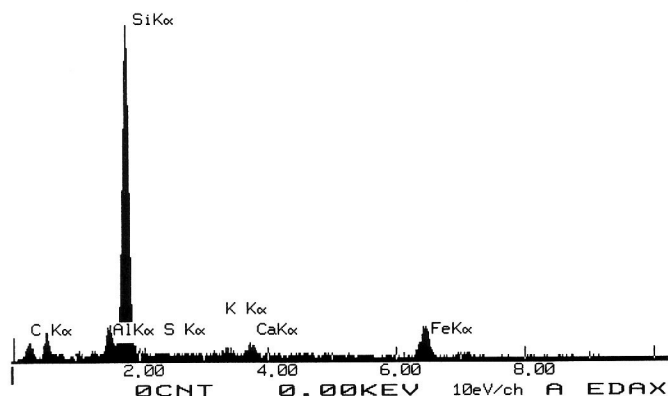
Abb. 41:
Gleicher Bildbereich wie Abb. 40 in der REM-Darstellung. Die Schmutzpartikel im Riss sind deutlich zu erkennen. Es handelt sich dabei nicht um Gips.
[REM-RE-Aufnahme am Dünnschliff]



Probe **S 3.1/1**
(Heilsbronner Tor,
Basis der nördlichen Taustabsäule)

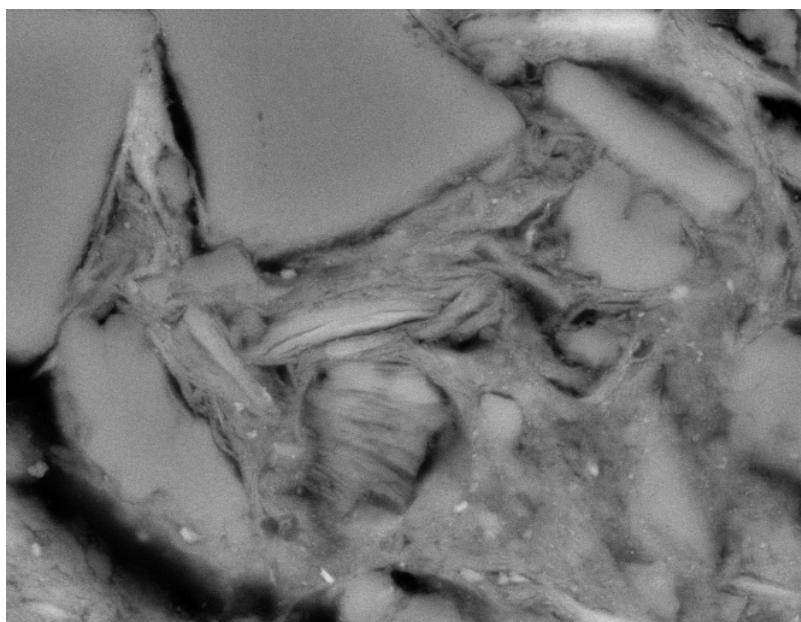
Abb. 42:
Detail (Rahmen) aus Abb. 41. Es sind bestimmte für Luftstäube typische Schmutzpartikel zu erkennen (Flugaschekugeln). Auffällig sind jedoch v.a. der für organische Schmutzschichten zu hohe Rückstreukoeffizient der Schmutzschicht (Pfeil).
[REM-RE-Aufnahme am Dünnschliff]

```
17-NOV-05 03:38:11 EDAX READY
RATE= 1CPS TIME= 60LSEC
FS= 1163CNT PRST= OFF
A =S3.1/2 Bindemittel Kruste
```



Probe **S 3.1/1**
(Heilsbronner Tor,
Basis der nördlichen Taustabsäule)

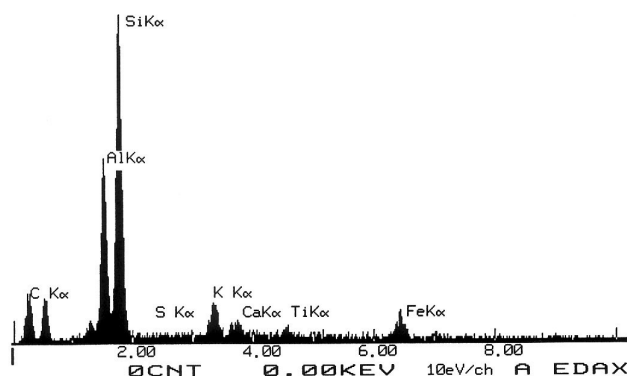
Abb. 43:
EDX-Analyse des durch Pfeil in Abb. 42 markierten Bereiches der Verschwärzung. Die Verschmutzung ist in diesem Bereich überwiegend silikatisch gebunden.
[EDX-Analyse]



Probe **S 3.1/1**
(Heilsbronner Tor,
Basis der nördlichen Taustabsäule)

Abb. 44:
Keramischer Scherben bei höherer Vergrößerung. Die blättchenförmigen Strukturen sind die Folge einer unvollständigen Sinterung des Rohstoffs und deuten auf eine niedrige Brenntemperatur bzw. zu kurze Brenndauer.
[REM-RE-Aufnahme am Dünnschliff]

```
17-NOV-05 03:39:34 EDAX READY
RATE= 1CPS TIME= 60LSEC
FS= 603CNT PRST= OFF
A =S3.1/2 Terrakotta
```



Probe **S 3.1/1**
(Heilsbronner Tor,
Basis der nördlichen Taustabsäule)

Abb. 45:
Elementzusammensetzung, aufgenommen an den blättchenförmigen Strukturen in Abb. 44.
Es handelt sich um einen für bestimmte Tonminerale typischen Elementbestand.
[EDX-Analyse]

3.1.3 Zusammenfassung

Zusammensetzung der Verschwürzungen bzw. Krusten:

Es sind drei Erscheinungsformen zu unterscheiden:

Poröse Gips/Schmutzkrusten (bis 1mm)

Charakteristische äußerliche Merkmale sind ihre grau-schwarze Färbung, eine zumeist raue, teilweise pustelige Oberfläche, sowie ihre geringe Festigkeit und die zumeist lockere Bindung bzw. Haftung am Untergrund. Typische Bestandteile sind organische und anorganische Staub- und Schmutzpartikel, die in einer porösen Gipsmatrix gebunden sind. Eine Identifizierung und Beschreibung ist meist bereits anhand eines Dünnschliffes im Polarisationsmikroskop möglich. Teilweise sind kleine Terrakottapartikel bzw. -schalen in den terrakotta zugewandten, hinteren Bereichen dieser Krusten enthalten. In diesen Fällen ist die Terrakotta bereits geschädigt.

Dünne, schwarze Schmutzschichten (5-10 µm)

Von den oben beschriebenen porösen Gips/Schmutzkrusten können die dünnen schwarzen Schmutzschichten augenscheinlich durch ihre häufig intensive schwarze Färbung und eine relativ glatte und feste Oberfläche unterschieden werden. Typische Bestandteile sind auch in diesen Oberflächenveränderungen organische und anorganische Staub- und Schmutzpartikel, deren Bin-

dung organisch oder anorganisch (silikatisch) vorliegen kann. Vor allem zur Klärung der Bindungsverhältnisse sind REM-Untersuchungen am Dünnschliff nach vorheriger PolMi-Untersuchung unumgänglich.

Gipshorizonte im oberflächennahen Porenraum

In mehreren Fällen konnten unter den dünnen schwarzen Schmutzschichten Verdichtungen des oberflächennahen Porenraumes durch die Abscheidung feinkristallinen Gipses nachgewiesen werden. Zum Erkennen dieser Gefügeveränderungen sind ebenfalls REM-Untersuchungen am Dünnschliff nach vorheriger PolMi-Untersuchung notwendig.

Beitrag der Verschwärzungen bzw. Krusten zu Schäden an den Terrakotten:

Terrakotten weisen häufig eine relativ dichte Brennhaut auf. Sie entsteht durch Feinstbestandteile des Tons, die bei der Herstellung (Schlämmen und Trocknen) an der Oberfläche abgelagert werden und im Ergebnis des Brennens eine wenige μm dünne, aber relativ dichte Haut bilden. Unter Bauwerksbedingungen bilden sich durch Depositionsvorgänge an der Terrakottaoberfläche zusätzlich dünne Auflagerungen und Krusten unterschiedlicher Zusammensetzung (Schichtdicken meist $<10 \mu\text{m}$). Hierdurch werden die wasser- und wasserdampftransporthemmenden Eigenschaften der Brennhaut zusätzlich verstärkt. In der Konsequenz ist sowohl die Aufnahme als auch die Abgabe von Feuchtigkeit stark behindert.

Durch bauliche Mängel in der unmittelbaren Umgebung der Terrakotten (unzureichende Wasserführung, ...Fugenauswaschungen, lokale Terrakottaschädigungen), kann Wasser in den Baukörper eindringen. Durch den Eintrag von SO_2 und gelöste calcitische Bestandteile bildet sich eine Gipslösung, die mit dem Feuchtestrom zur Oberfläche transportiert wird.

Aufgrund der Oberflächenverdichtung durch Brennhaut, Auflagerungen und Krusten ist ein kapillarer Transport der Gipslösung an die Oberfläche nicht möglich. Das hat eine Verlagerung der Verdunstungsfront zur Folge.

Nach Übersättigung durch Abgabe des Wassers über Wasserdampfdiffusion kristallisiert Gips im oberflächennahen Porenraum eines 0,5 bis 1 mm breiten Gefügeabschnittes. Die Abscheidung feinkristallinen Gipses hat eine Verdichtung des Porenraumes und eine Erhöhung des Anteils kleiner Poren zur Folge. Diese Verschiebung der Porenradienverteilung kann zu einer lokalen Frostanfälligkeit führen. Gipskristallisation im oberflächennahen Porenraum ist hinsichtlich der Beständigkeit einer Terrakotta in zweifacher Hinsicht als negativ zu bewerten.

Durch die Vergipsung ist eine Transport- bzw. Trocknungsblockade entstanden, die bei Hinterfeuchtung zu einem Feuchtestau führt. Gleichzeitig ist die Frostbeständigkeit im Gipshorizont verringert. Damit liegen Bedingungen vor, die bei Frosteinwirkung, insbesondere an relativ schwach gebranntem Material, schadensauslösend sind und erste Rissbildungen zur Folge haben.

In der weiteren Schadensentwicklung entsteht eine 0,5 bis 1 mm dünne Terrakotta/Gips-Schale mit anderen Materialeigenschaften als die unveränderte Terrakotta. Die vorhandenen Risse schaffen zusätzliche oberflächenparallele Wegsamkeiten für Feuchtigkeit bzw. Salzlösung. Eine Folge ist verstärkte Gipskristallisation. Bei thermisch-hygrischer Wechselbeanspruchung treten außerdem Scherspannungen auf, die zunächst ein Auffächern der Schale in dünne, gipsstabilisierte Terrakotalamellen und schließlich die Ablösung der gesamten Schale von der Terrakotta zur Folge haben.

Weitere Schadensursachen:

Nicht frostbeständige Terrakotta bzw. Ziegel:

Aus den mikroskopischen Erscheinungsbildern der Ziegel der Taustabsäulen des **Heilsbronner Tors** ergeben sich Hinweise auf eine möglicherweise unzureichende Frostbeständigkeit. Der keramische Scherben enthält tonmineralähnliche Strukturen, die als Relikte des Lehms anzusehen sind, aus dem die Keramik hergestellt wurde. Sie sind Ausdruck eines für Ziegel ungewöhnlich geringen Sintergrades. Es besteht eine grundsätzliche Korrelation zwischen Rohstoff, Brenntemperatur/Brenndauer, Sintergrad und Beständigkeit. Mit zunehmender Sinterung verändern sich die Tonminerale zu einem kompakten keramischen Scherben mit geringen Feinstrukturen. Beispiele hierfür sind die Keramik der Säulenbasis aus dem Kreuzgang der Friedenskirche und v.a. die Keramik (oder besser das Steinzeug) vom Campanile der Friedenskirche. Im umgekehrten Fall kann aus mikroskopisch erkennbaren Schichtsilikaten auf relativ niedrige Brenntemperaturen geschlos-

sen werden, die Ausdruck eines nicht frostbeständigen Materials sein können. Besonders ausgeprägt ist dieser Verdacht für die Taustabsäulen des Heilsbronner Tors.

Die **Terrakottaprobe** der **Römischen Bäder**, die ebenfalls Schäden aufweisen, die mit Frost im Zusammenhang stehen können, zeigen bereichsweise ebenfalls tonmineralähnliche Relikte. Eine eingeschränkte Frostbeständigkeit ist nicht auszuschließen.

Schlußfolgerungen für die Restaurierung:

Poröse Gips/Schmutzkrusten

An den untersuchten Objekten sind die porösen Gips/Schmutzkrusten schadensrelevant. Falls Terrakottapartikel bzw. –schalen in den Krusten nachweisbar sind, ist die Terrakotta bereits nennenswert geschädigt (**Römische Bäder: Bacchantengelage, Panmaske**). Vertiefende Untersuchungen zu Ursachen und Umfang der Schädigung sowie anschließende restauratorisch/konservatorische Maßnahmen (Reinigung, Festigung, Entfernung des Gipses etc.) sind erforderlich.

Dünne, schwarze Schmutzschichten und innen liegende Gipshorizonte

Die Entstehung der innen liegenden Vergipsungen steht in ursächlichem Zusammenhang mit dem Vorhandensein der dünnen schwarzen Schmutzschichten (**Römische Bäder: Bacchantengelage, Satyrmaske**). Die Existenz solcher Gipshorizonte hat an den o.g. Objekten bereits zu Schädigungen geführt. Grundsätzlich sind sie als Vorschädigung und als kritischer Zustand zu betrachten. Untersuchungen zum Erkennen solcher Zustände sowie ggf. restauratorisch/konservatorische Maßnahmen zur Entfernung des Gipses aus dem Porenraum der Terrakotta sind erforderlich (z.B. über angepasste Ionenaustauscher oder Ammoniumcarbonatbehandlung).

Ungenügende Frostbeständigkeit der Keramik

Die Ziegel der **Taustabsäulen des Heilsbronner Tors** sind mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht frostbeständig. Bei entsprechenden Belastungen ist mit weiter fortschreitenden Schäden zu rechnen. Für die Terrakottareliefs der **Römischen Bäder (Bacchantengelage, Satyrmaske)** die ebenfalls Schäden aufweisen, die mit Frost im Zusammenhang stehen könnten, ist eine eingeschränkte Frostbeständigkeit nicht auszuschließen.

3.2 Materialkundliche Untersuchungen Terrakottaamphoren Neue Orangerie

3.2.1 Vorbemerkungen

In diesem Kapitel werden Untersuchungen beschrieben, die vorrangig der Entwicklung einer Restaurierungskonzeption für die Amphoren der Neuen Orangerie dienen. Dabei zu berücksichtigende bzw. abzusichernde restauratorische Maßnahmen waren:

- Reinigung der Terrakottaoberflächen
- Klebung von gerissenen Vasenfragmenten

Folgende Untersuchungen wurden dementsprechend durchgeführt.

Mechanisch-physikalische Eigenschaften des keramischen Scherbens:

- Rohdichte (RD)
- Offene Porosität (OP)
- Wasseraufnahme (WA)
- Dynamischer E-Modul (E_{dyn})
- Thermische und hygri sche Dehnung

Mikroskopische Untersuchungen:

- Polarisationsmikroskopie (PolMi)
- Raster-Elektronenmikroskopie (REM) + Energiedispersive Röntgenmikroanalyse (EDX)

Probenbeschreibung und Fragestellungen:

Probe	Herkunft	Beschreibung	Fragestellung
Vasen - Terrakotta und Füllmörtel			
S 7.1/1	Vase Orangerie	Bruchstück Vasenkörper	<ul style="list-style-type: none"> Charakterisierung des keramischen Scherbens - RD, OP, WA, E_{dyn}, - Thermische und hygryische Dehnung
S 7.1/2		Prisma Vasenfuß	
S 7.1/3		Vasenfuß, gleicher Scherben wie S 7.1/2	<ul style="list-style-type: none"> DF
S 7.1/4	Vase Orangerie	Füllkörper der Vase (Mörtel)	<ul style="list-style-type: none"> Mörtelbindemittel der Verfüllung (früher Zement, 1851 bis 1860) Thermische und hygryische Dehnung
S 7.1/5			<ul style="list-style-type: none"> Reserve
S 7.1/6			<ul style="list-style-type: none"> Reserve
Kunststoffgebundene Klebmassen und Terrakotta-Vergleichsprobe			
01	Werkstatt FHP	Araldit BY158 mit Härter Aradur21 (früher HY2996), Fa. Huntsmann	<ul style="list-style-type: none"> Thermische und hygryische Dehnung
02		Viscacid Epoxi-Injektionsharz 100, Fa. Remmers	
03		Araldit-Harz mit Hohlglas-kugeln K1, Fa. 3M	
04		Viscacid-Harz mit Hohlglas-kugeln K1, Fa. 3M	
05		Terrakotta (Originalmaterial Amphore)	

3.2.2. Untersuchungsergebnisse

Krusten und Beläge der Amphoren (Untersuchung PoMi+REM+EDX):

Die visuell wahrnehmbare graue bis schwarze „Färbung“ der Terrakottaoberflächen der Amphoren wird durch auflagernde Schichten hervorgerufen. Mittels REM/EDX konnte an allen Proben nachgewiesen werden, dass es sich um Si-reiche Schichten handelt, in denen verschiedene färbende und nicht färbende **terrakottafremde Partikel** eingeschlossen sind. Die Schichtdicken liegen meist unter 5 µm. Diese „**thin black layers**“ können mikroskopisch sicher von der Keramik abgegrenzt und als Verwitterungsprodukt identifiziert werden. **Bezüglich des „Bindemittels“ ist davon auszugehen, dass es sich um amorphe Kieselsäure handelt**, die sehr wahrscheinlich aus dem keramischen Material im Laufe der Zeit freigesetzt wurde.

Der Grad der Vergrauung bis hin zur Schwärzung wird weniger durch die unterschiedlichen Schichtdicken als durch die Art und Menge der darin enthaltenen Partikel bestimmt. Dabei handelt es sich neben kleinen, farblosen Mineralkörnern (Quarz, Feldspat, Schwespat) um Partikel aus Oxiden/Hydroxiden oder Sulfiden der folgenden Elemente: Fe, Pb, Zn, Ti, Ti/Fe, V und Cu. In geringen Mengen enthalten die Si-Schichten auch Cl und S, vereinzelt zusätzlich P. Zahlreiche der aus diesem Elementbestand möglichen chemischen Verbindungen sind schwarz.

Zusätzlich können feine organische, in den Schichten eingeschlossene Schmutzpartikel zur Schwärzung der Schmutzschichten beigetragen haben. Anreicherungen mit hohen organischen Anteilen finden sich in Vertiefungen auf fast allen Schmutzschichten. In diesen „Nestern“ sind mit der EDX stets auch Cl und S nachweisbar. Kristalline Salze treten vereinzelt in Form winziger NaCl-Kristalle auf. **Gips ist weder auf noch innerhalb der Schmutzschichten vorhanden.**

Übersicht über die durchgeführten Laboruntersuchungen (/1 bis /3 Keramik und /4 Mörtel):

Probe	RD	WA	OP	Druckfestigkeit	Dyn. E-Modul	Hygrische Dehnung	Thermische Dehnung
S 7.1/1	x	x	x		x	x	x
S 7.1/2	x	x	x			x	x
S 7.1/3				x	x		
S 7.1/4	x	x	x	x	x	x	x

Materialkennndaten der Terrakotta und des Füllmörtels:

Proben-Bez.	RD [g/cm ³]	WA [M%]	OP [V%]	DF [N/mm ²]		E _{Dyn.} [kN/mm ²]	Hygr. Dehn. [µm/m]	Thermische Dehn. [µm/m °C]
				Ew.	Mw.			
S 7.1/1	1,99	5,5	10,9			35,4	27	13,2
S 7.1/2	1,98	5,2	10,3				20	21,7
S 7.1/3				41,5 44,7 39,0	41,7	31,4		
S 7.1/4	1,91	10,5	20,0			21,9	262	26,8

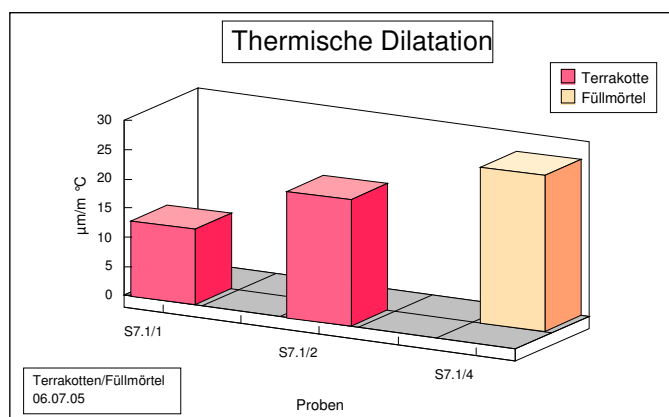


Abb. 46: Proben S7.1/1, S7.1/2, S7.1/4. Thermische Längenänderung, gemessen an Scheiben durch Abkühlen von zuvor auf 50 - 60 °C aufgeheizten Prüfkörpern auf Raumtemperatur.

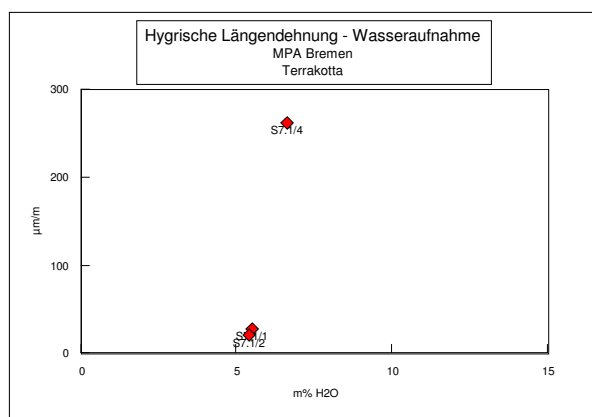


Abb. 47: Proben S7.1/1, S7.1/2, S7.1/4. Hygrische Längenänderung und zugehörige freie Wasseraufnahme, gemessen durch 48 h Lagerung unter Wasser.

Untersuchung kunststoffgebundener Klebmassen:

Übersicht über die an den Klebmassen durchgeführten Laboruntersuchungen:

Probe	Hygrische Dehnung	Thermische Dehnung
01	x	x
02	x	x
03	x	x
04	x	x
05	x	x

Thermische und Hygrische Dehnung der Klebmassen und der Terrakotta-Vergleichsprobe. Für die thermische Dehnung sind sowohl die Ergebnisse der Messungen an der FH Potsdam als auch die des Labors Dr. Wendler, München wiedergegeben:

Angaben zur thermisch-hygrischen Dehnung:

Proben-Bez.	Hygrische Dehnung [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Thermische Dehnung [$\mu\text{m}/\text{m } ^\circ\text{C}$]	
		FH Potsdam ¹⁾	Labor Dr. Wendler
01	2	62	192,7
02	38	76	164,6
03	92	38	101,9
04	120	37	51,3
05	15	6	20,5
PMMA (zum Vergleich)		70-80	70-80

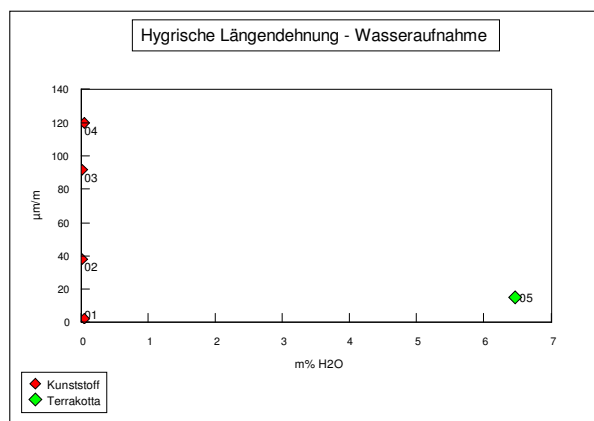
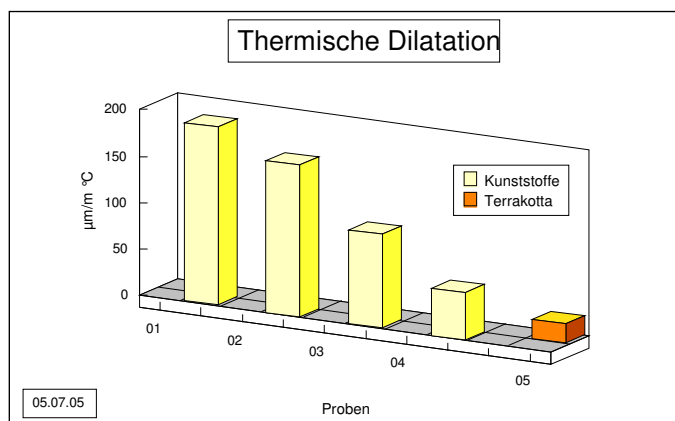


Abb. 48: Proben 01 - 05 (Messung Labor Dr. Wendler). Thermische Längenänderung, gemessen an Scheiben durch Abkühlen von zuvor auf 50 - 60 °C aufgeheizten Prüfkörpern auf Raumtemperatur.

Abb. 49: Proben 01 - 05 (Messung Labor Dr. Wendler). Hygrische Längenänderung und zugehörige freie Wasseraufnahme, gemessen durch 48 h Lagerung unter Wasser.

3.2.3 Zusammenfassung

Vergleich der an Terrakotta, Zementmörtel und Kunststoffklebern ermittelten Materialkennwerte (gerundete Werte oder Schwankungsbreite):

	RD [g/cm ³]	WA [M-%]	OP [Vol-%]	DF [N/mm ²]	E _{dyn.} [N/mm ²]	Hygr. Dehn. [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Therm. Dehn. [$\mu\text{m}/\text{m } ^\circ\text{C}$]
Terrakotta	2,0	5,4	10,6	41,7	33,4	24	17,5
Füllmörtel	1,9	10,5	20,0	n.b.	21,9	262	26,8
Kunststoffkleber	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.		2 - 120	51 - 193

Die Materialkennwerte der Terrakotta weisen die Keramik als hoch gebranntes, relativ dauerhaftes (wetterungsbeständiges) Material aus. Sowohl die hygrische als auch die thermische Dehnung sind als unkritisch einzustufen.

Das **Füllmaterial** der Vasen ist ein Zementmörtel, der durch häufige Wassereinwirkung stark verändert wurde. Das hygrische Quellmaß liegt um den Faktor 10 über der Terrakotta; Treiberscheinungen des Füllmörtels sind daher ursächlich an der Rissbildung der Amphorenkörper beteiligt.

Die kunststoffbasierenden **Klebstmassen** zeigen große Unterschiede in ihrem hygri-schen und thermi-schen Dehnungsverhalten. Erwartungsgemäß zeigt der reine Kunststoff (Probe 01) eine sehr geringe hygri-sche Dehnung, aufgrund seiner thermoplastischen Eigenschaften aber eine relativ hohe thermische Dehnung. Die Zugabe von Hohlglaskugeln (Proben 03 und 04) reduziert die thermische Dehnung (Ver-ringerung des Kunststoffanteils). Gleichzeitig erhöht sich aber die hygri-sche Dehnung. Die an der FH Potsdam ermittelten Messwerte der thermischen Dehnung liegen um den Faktor 2-3 unter denen, die vom Labor Dr. Wendler gemessen wurden, zeigen aber die gleichen Tendenzen hinsichtlich des Einflusses der Hohlglaskugeln.

3.3 Makro- und mikroklimatische Charakterisierung der Terrakottaamphoren der Neuen Orangerie ¹⁵

3.3.1 Vorbemerkungen

Befeuchtung und Trocknung sowie Erwärmung und Abkühlung freibewitterter Terrakottaobjekte führen zu dynamischen Beanspruchungen der Oberflächen, die sich je nach Qualität der Bauausführung und Bau-unterhaltung zu einem Schadensrisiko summieren können. Nicht nur die langfristigen saisonalen Klima-schwankungen (Sommer- und Winterextrema) sind zu berücksichtigen, sondern ebenso die häufig unter-schätzten Wirkungen der täglichen Temperaturwechsel infolge Sonneneinstrahlung oder nächtlicher Ab-strahlung. An strahlungsreichen Sommertagen mit klaren Nächten können diese Schwankungen in die Größenordnung der Jahresamplitude gelangen. Im Rahmen des Projektes erfolgten dabei Klimamessun-gen an einer Terrakotta-Amphore (Standplatz Nr. 7) der Neuen Orangerie im Park Sanssouci. Ziel der Untersuchung ist die Beurteilung der klimabedingten Materialbeanspruchungen aufgrund zeitlicher und örtlicher Klimaentwicklung. Dazu sind Oberflächentemperaturmessungen in verschiedener Exposition durchzuführen sowie der Feuchtgradient zwischen Innenraum des Gefäßes und der Außenluft zu ermit-teln.

Die Vase ist in Hohlkörper und Sockel gegliedert, die beide aus Terrakotta bestehen. Der Originaldeckel ist nicht mehr vorhanden und durch einen schmucklosen zementgebundenen Ersatzdeckel ausgetauscht. Verunreinigungen auf dem Boden der Amphore deuten darauf hin, das diese einige Zeit ohne Deckelab-schluss offen stand und frei bewittert wurde.

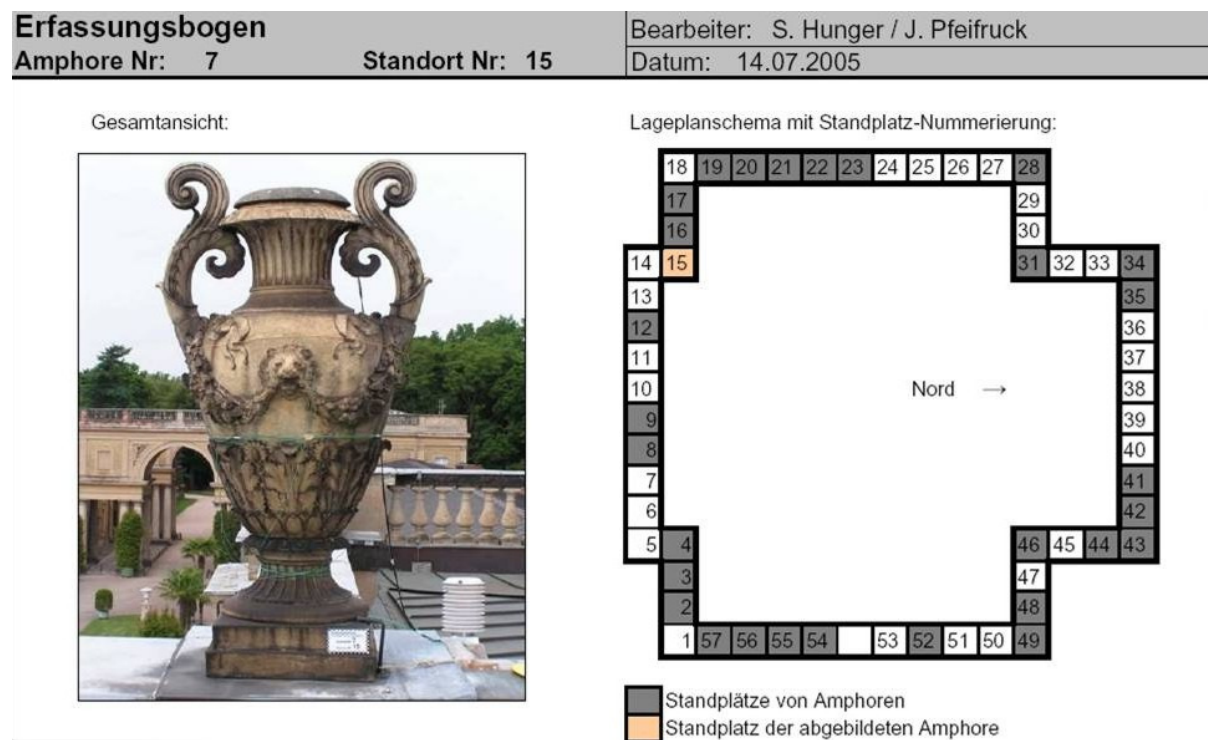


Abb. 50: Standort der zur Langzeitklimamessung ausgewählten Amphore

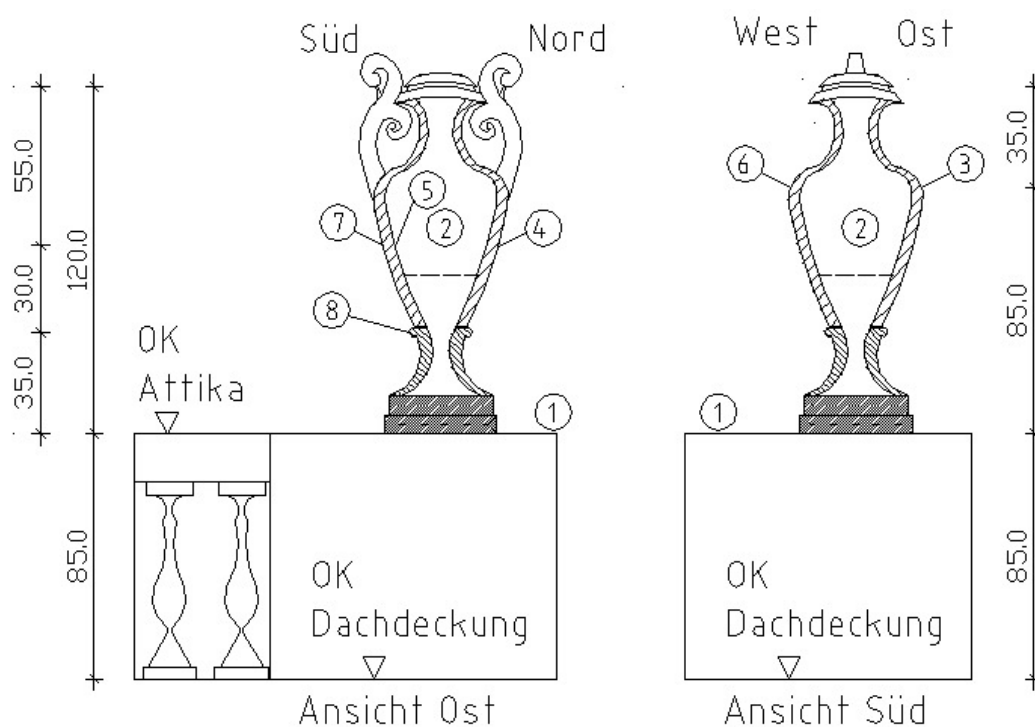
¹⁵ Eckermann (2006) Bauklimatische Messungen

Die Klimamessung erfolgte im Zeitraum von Juni 2005 bis Mai 2006. Für den Zeitraum eines Jahres wurden im Messzyklus von 1/4 Stunde die Temperatur und Feuchte der Außenluft und der Luft in der Vase sowie die Temperaturen in allen vier Himmelsrichtungen auf der äußeren Oberfläche des Gefäßes gemessen.

Die Messpunkte befinden sich in zwei verschiedenen Höhenlagen auf der Vase, so dass nur die Messpunkte 3 und 6 (Ost und West) sowie die Messpunkte 4 und 5 (Nord und Süd) direkt miteinander verglichen werden können.

Zur Ermittlung des Temperaturgradienten über den Wandquerschnitt dient ein Temperatursensor auf der inneren Oberfläche der Vase [Messpunkt 5 T(i,süd)], der direkt gegenüber dem Messpunkt 7 T(süd) angeordnet ist. Ein weiterer Temperatursensor auf einer schwarzen Kruste im unteren Bereich, Nr. 8 [T(süd,sw)], dient zur Beurteilung der Auswirkung von Krustenbildungen an den Oberflächen auf Wärmeabsorption und Temperaturverlauf.

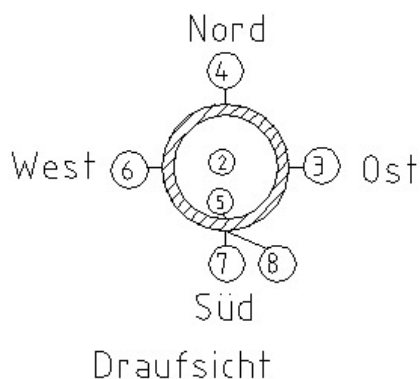
Die folgende Abbildung Abb. 51 zeigt eine Übersicht der Messorte und der zugehörigen Meßfühler:



Übersicht Fühler

Nr [Messstelle] Bezeichnung (Einheit)

- 1 [0.0] außen Luft (T)
- 1 [0.10] außen Luft (rF)
- 2 [0.1] innen Vase (T)
- 2 [0.11] innen Vase (rF)
- 3 [0.2] außen Ost oben (T)
- 4 [0.3] außen Nord oben (T)
- 5 [0.4] innen Süd oben (T)
- 6 [0.12] außen West oben (T)
- 7 [0.13] außen Süd oben (T)
- 8 [0.14] außen Süd schwarze Kruste (T)



3.3.2 Untersuchungsergebnisse

Temperaturverhalten

Auf der Oberfläche der Keramik kommt es im zeitlichen Verlauf und in der örtlichen Verteilung zu ausgeprägten Temperaturvarianzen. Aufgrund der freien Exposition sind schnelle Temperaturwechsel durch Sonnenstrahlung sowie Windeinflüsse signifikant. Maßgeblich für die lokal und zeitlich differierenden Wärmebeanspruchungen sind die jeweilige Orientierung und die Lage des Messpunktes auf der Vase. In folgender Abbildung ist der für die jahreszeitlich und täglich variierenden Strahlungen ursächliche Sonnenstand (Himmelsrichtung und Höhenwinkel) schematisch dargestellt.

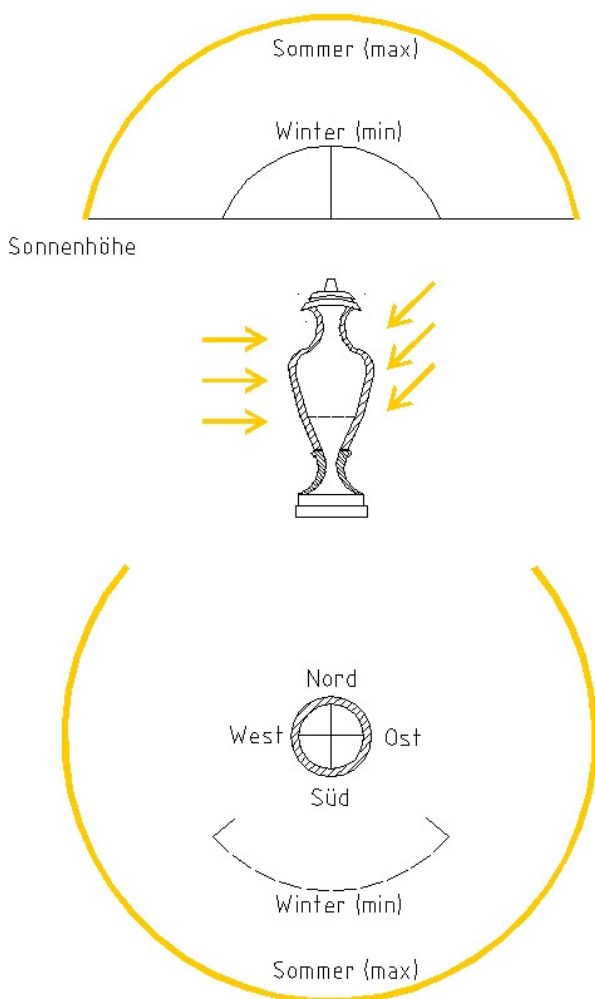


Abb. 52: Schematische Darstellung des saisonal und täglich wechselnden Sonnenstandes

Eine unterschiedliche Höhenlage des Messpunktes auf der Amphore beeinflusst dabei aufgrund der unregelmäßig gekrümmten Oberfläche ganz wesentlich den Strahlungswinkel und damit die auftreffende Wärmestrahlung. Weiterhin muss zwischen frei angeströmten Flächen und Vertiefungen unterschieden werden, wobei letztgenannte geschützte Lage insbesondere im Winter bei Zustrahlung eine deutliche Temperaturerhöhung bewirken kann.

Feuchteverhalten

Die Messungen zeigen eindeutig, dass die Luftfeuchte (absoluter Feuchtegehalt) in der Amphore im Jahresmittel um ca. 25 % über den Außenwerten liegt. Auch die von der „integralen Ausgleichsfeuchte“ (Mittelwert aller inneren Oberflächen) bestimmte mittlere relative Luftfeuchte liegt mit ca. 92 % deutlich über dem mittleren Außenwert von 84 % (außerdem $T(i) > T(a)$ im Jahresdurchschnitt!). Daraus ist eindeutig auf die Existenz einer „Feuchtequelle“ zu schließen.

Die im Tages- und Jahresverlauf erkennbare Dämpfung der äußeren Feuchteschwankung in der Vase ist aufgrund der umgebenden mineralischen Materialien im Prinzip verständlich, auch wenn deren Feuchteaufnahme im flüssigen und dampfförmigen Zustand eher gering ist. Die Vase kann mit einem Raum oder einem kleinem Gebäude mit geringer Lüftung verglichen werden (z.B. einer Kapelle). Auch dort gibt es eine jahreszeitliche Dämpfung und Zeitverzögerung des äußeren Feuchteverlaufes aufgrund der umgebenden Bauteilmasse.

Das Klimaverhalten in der Amphore ist in der folgenden Abbildung für einen strahlungsreichen Sommertag schematisch dargestellt. Der Innenraum erwärmt sich aufgrund der erhöhten Oberflächentemperaturen über die Außentemperatur. Die damit üblicherweise verbundene Absenkung der relativen Luftfeuchte fällt jedoch sehr moderat aus.

Obwohl die maximalen Temperaturen über den Außentemperaturen liegen, sinkt die relative Luftfeuchte deutlich geringer als die Außenfeuchte. Eine Abgabe von Feuchte aus dem Gefäß (Desorption) wirkt dem Absinken der relativen Luftfeuchte entgegen.

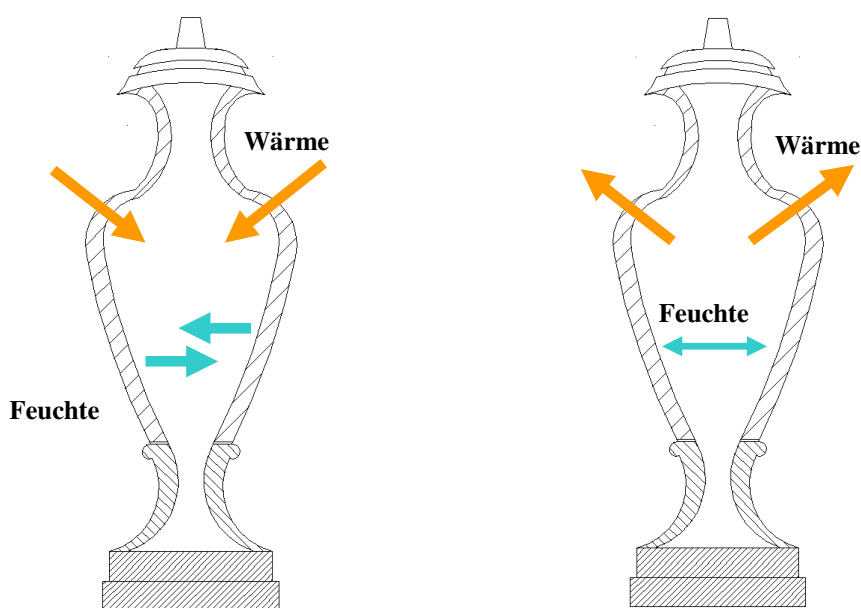


Abb. 53: Prinzipskizze zum Klimaverhalten in der Amphore bei Temperaturschwankungen

Die anschließend wiedergegebenen Messergebnisse zeigen eindeutig, dass die Innenfeuchte und die korrespondierende Materialfeuchte ein leicht erhöhtes Feuchteniveau gegenüber der üblichen Ausgleichsfeuchte aufweisen. Die o.g. „Feuchteaktivität“ zeigt sich vor allem in der Feuchteabgabe bei Temperatursenken. Setzt man voraus, dass die Keramik „trocken“ und an den Oberflächen weitgehend hydrophob ist – die o. g. Laboruntersuchungen belegen diese Annahme – so ist der Verfüllmörtel als alleinige Feuchtequelle zu betrachten.

Die folgende Infrarotthermografie an einem Sommermorgen zeigt Temperaturen von Mitte 20 Grad an der Westseite und Mitte 40 Grad an der Ostseite in Sonnenrichtung.

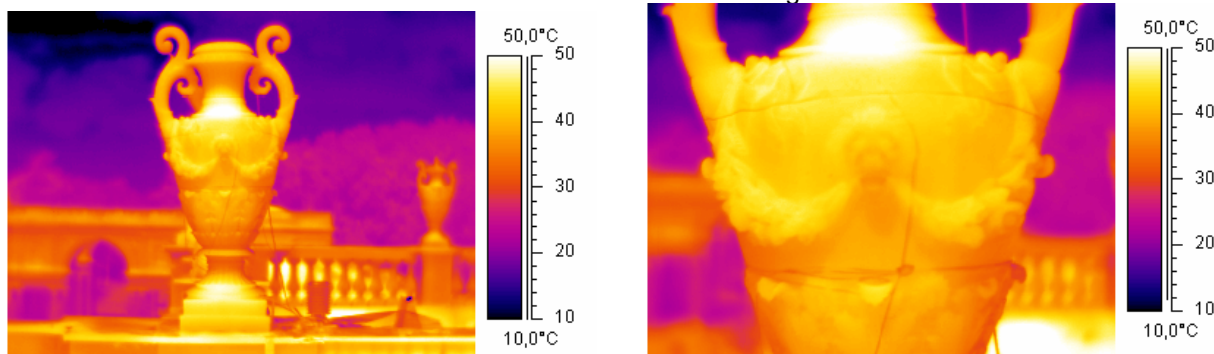


Abb. 54: Ansicht von Osten / Aufnahme am 15. Juni 2005 um 9,30 Uhr

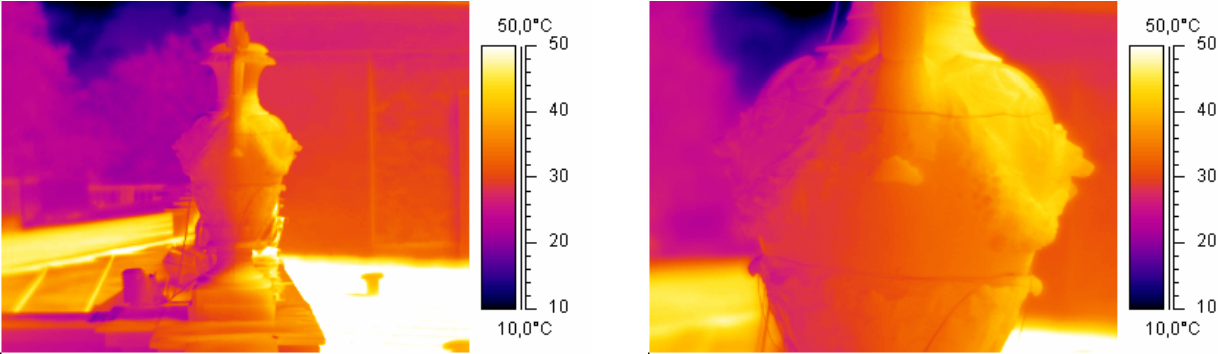


Abb. 55: Ansicht von Süden / Aufnahme am 15. Juni 2005 um 9,30 Uhr

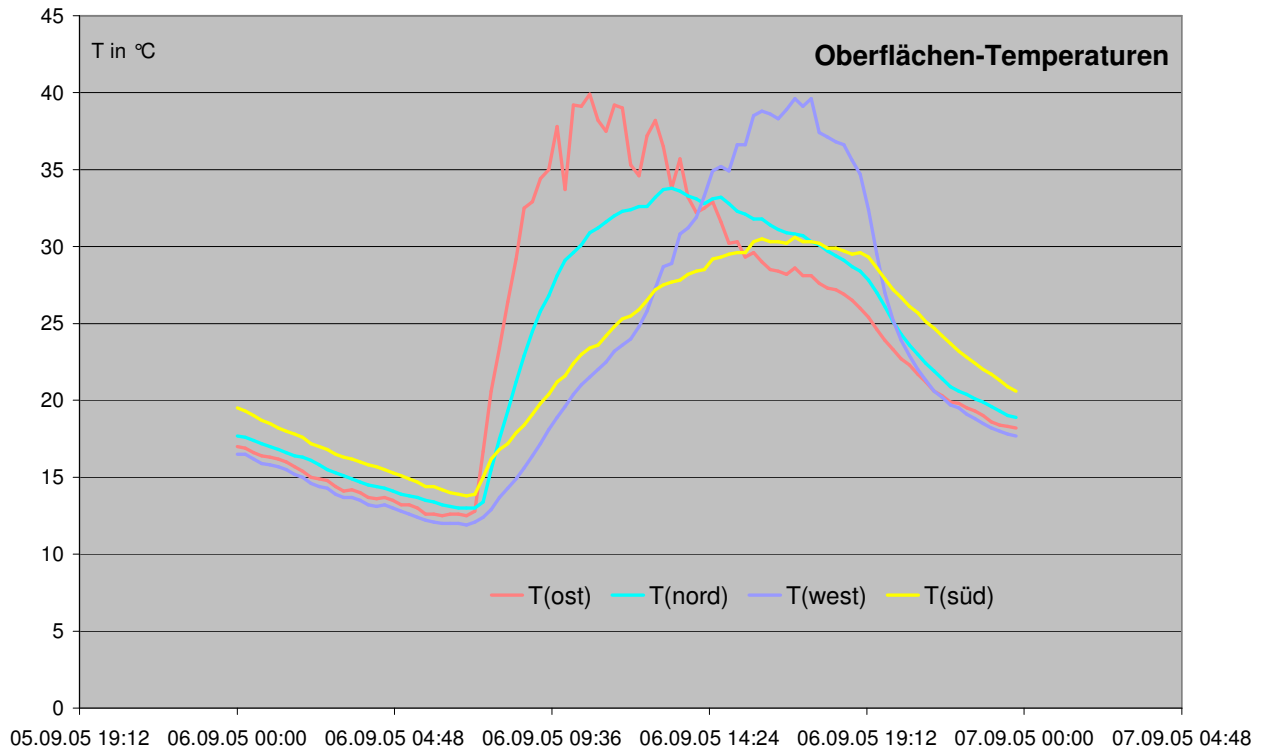


Abb. 56: Tagesverlauf der Oberflächentemperaturen im September

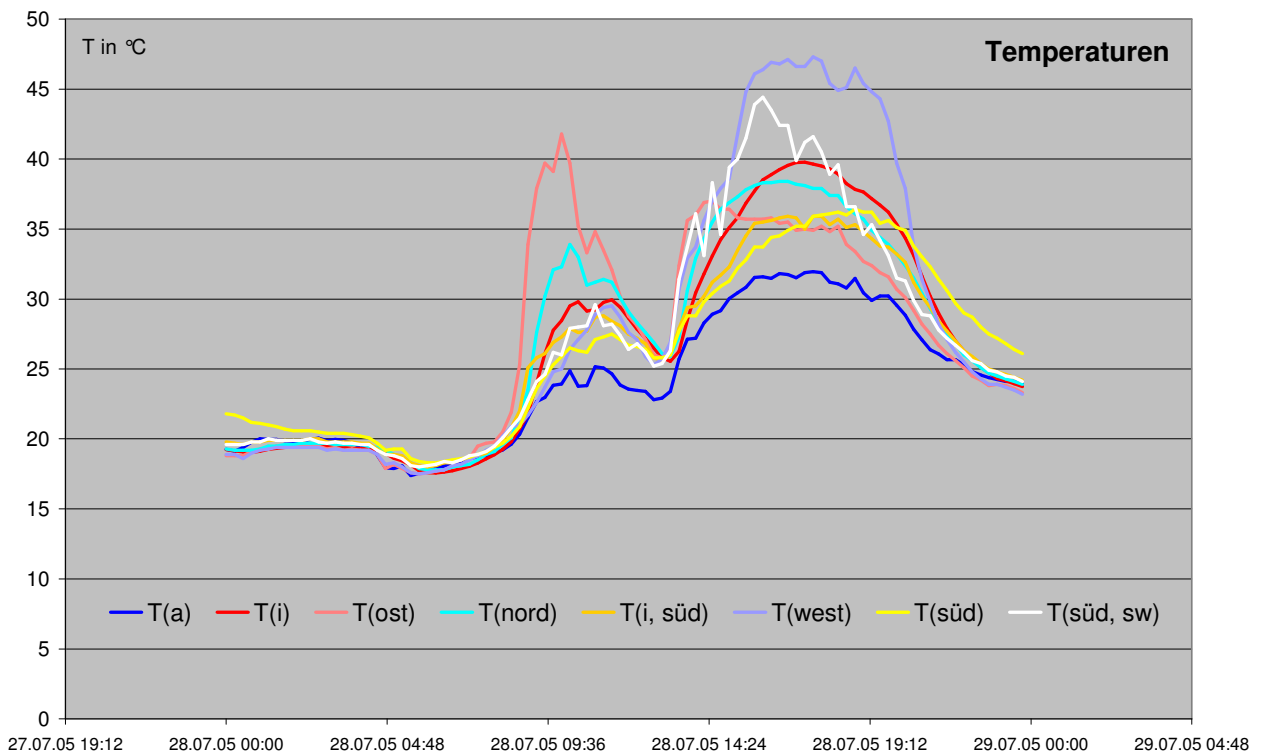


Abb. 57: Tagesverlauf der Temperaturen im Juli (Temperaturabfall durch zeitweise Verschattung ist deutlich erkennbar)

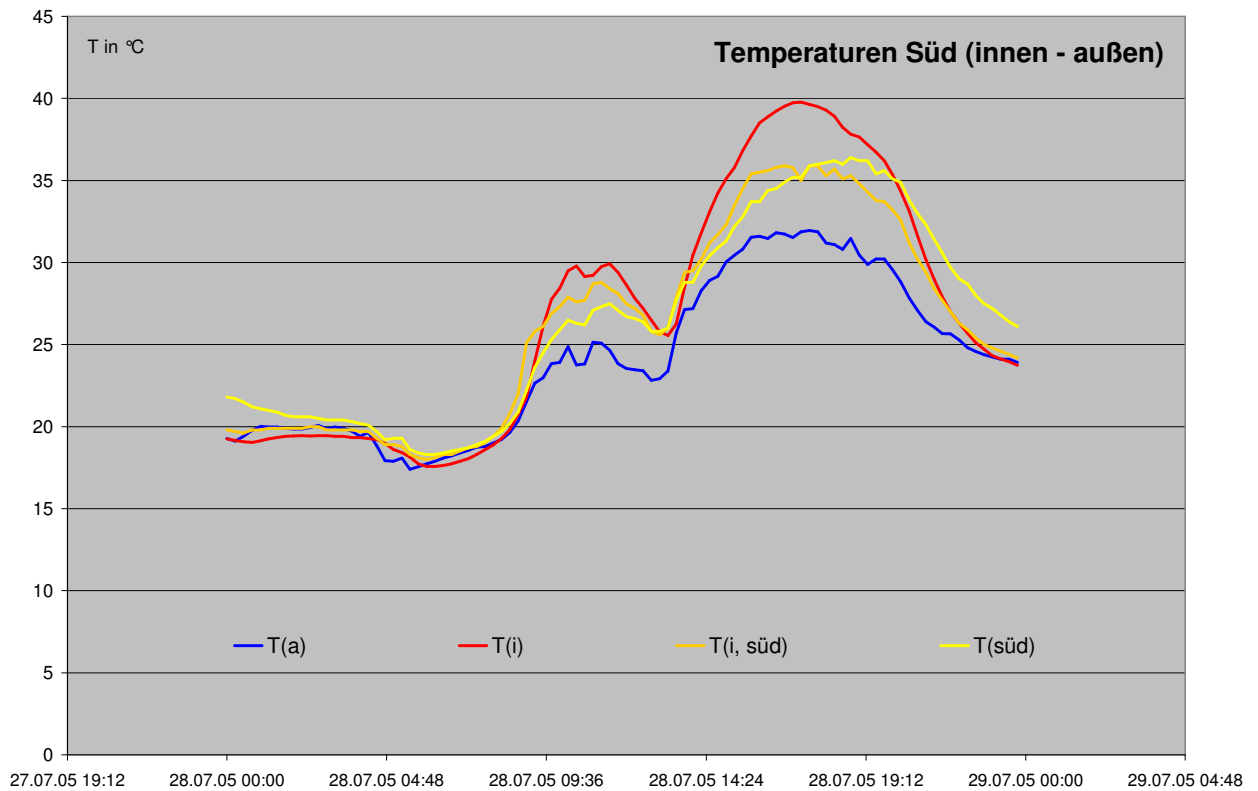


Abb. 58: Tagesverlauf der Oberflächentemperaturen im Juli

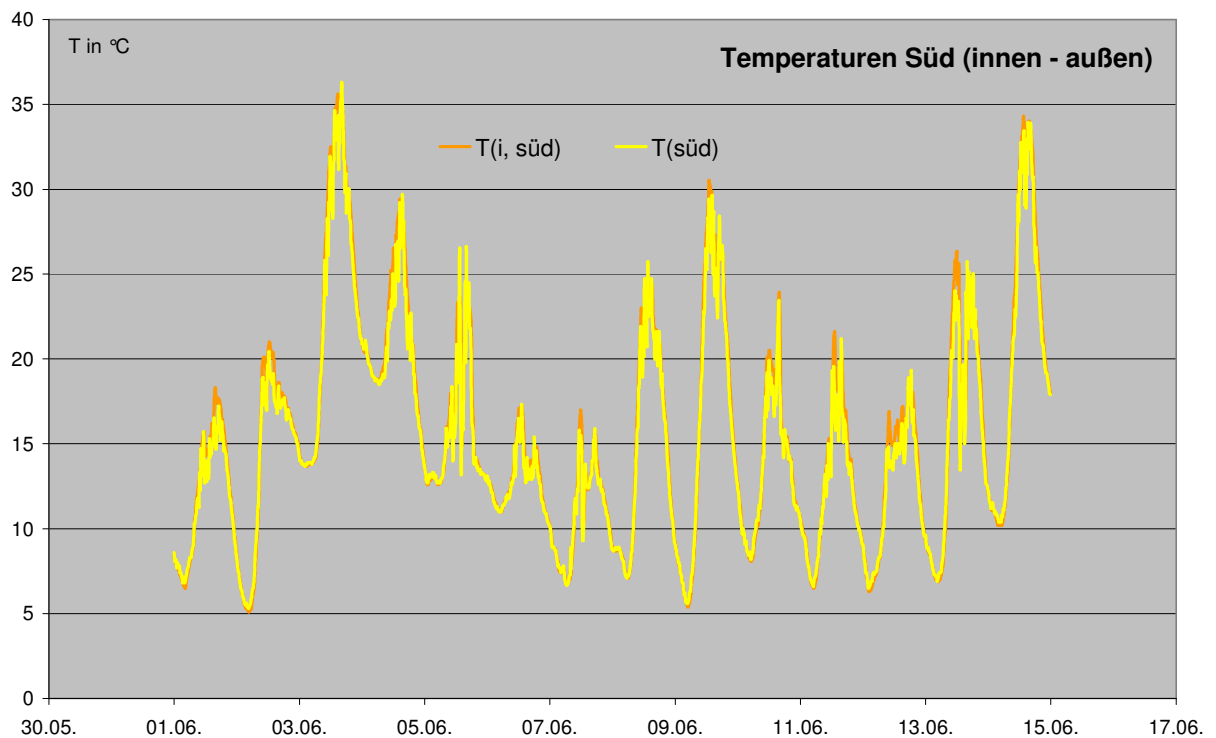


Abb. 59: Wandtemperatur (innen und außen) im Juni

Der Temperaturgradient zwischen der äußeren und inneren Oberfläche der Vase ist gering. Die Terrakotta besitzt eine Rohdichte von annähernd 2.000 kg/m^3 , mit entsprechend hoher Wärmeleitfähigkeit. Die spezifische Wärmekapazität ist ebenfalls hoch, die absolute Wärmespeicherung aufgrund einer Wanddicke von ca. 2 cm eher gering ausgeprägt. Temperaturgradienten zwischen Innen- und Außenseite sind bei starker Zustrahlung nach kalter Witterung zu erwarten (z.B. Morgensonne nach kalter Winternacht).

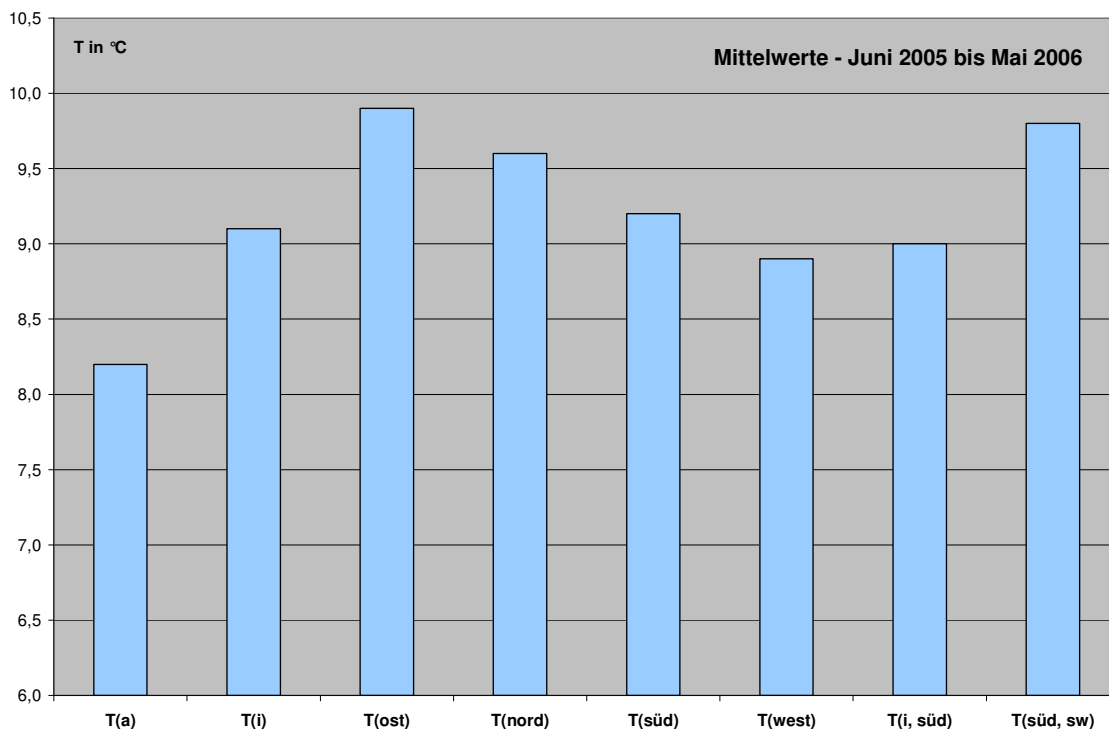


Abb. 60: Jahres-Mittelwerte der Temperaturen

Die Unterschiede der Mittelwerte der Oberflächentemperaturen betragen maximal 1 Kelvin. Im Jahresverlauf ergeben sich auf der frei angestrahlten Ostseite der Amphore sowie auf der Südseite im Bereich der Vertiefung die höchsten Temperaturwerte. Die Lufttemperatur im Gefäß liegt nur ca. 1 Kelvin über der Außentemperatur.

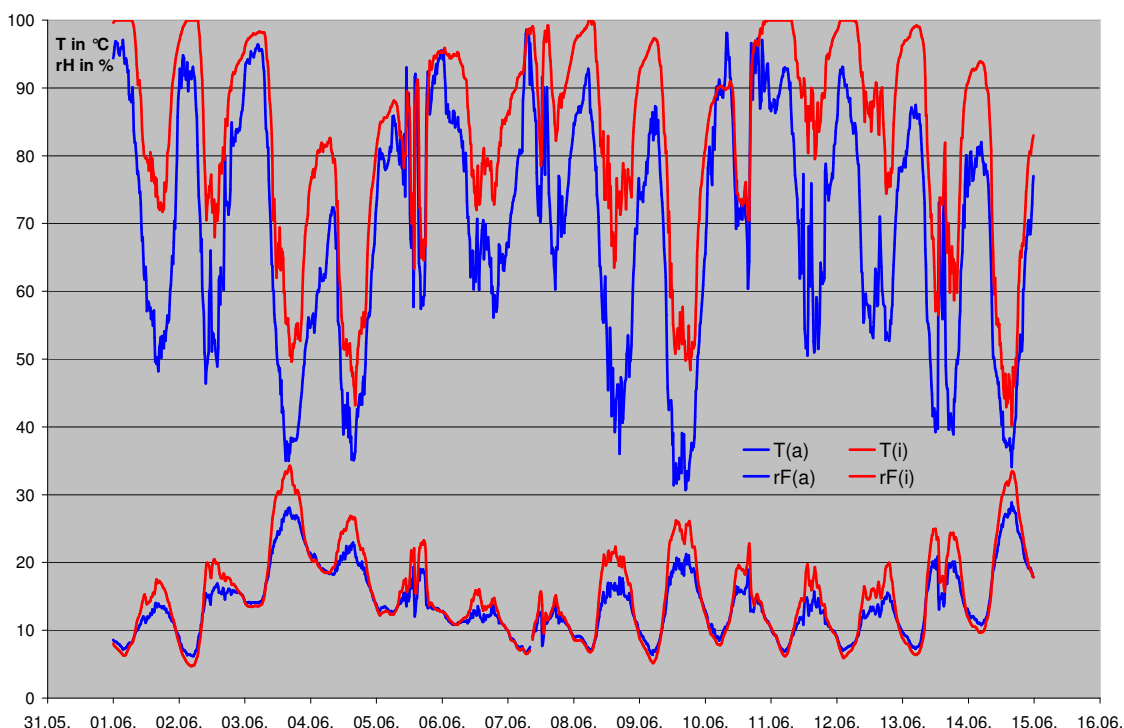


Abb. 61: Lufttemperatur und relative Luftfeuchte im Juni (innen und außen)

Deutlich ist die Dämpfung der Änderung der relativen Luftfeuchte im Gefäß erkennbar. Obwohl die maximalen Temperaturen über den Außentemperaturen liegen, sinkt die relative Luftfeuchte erheblich geringer als die Außenfeuchte. Die Pufferung der Luftfeuchte wird durch die Desorption von Feuchte aus dem Gefäß verursacht.

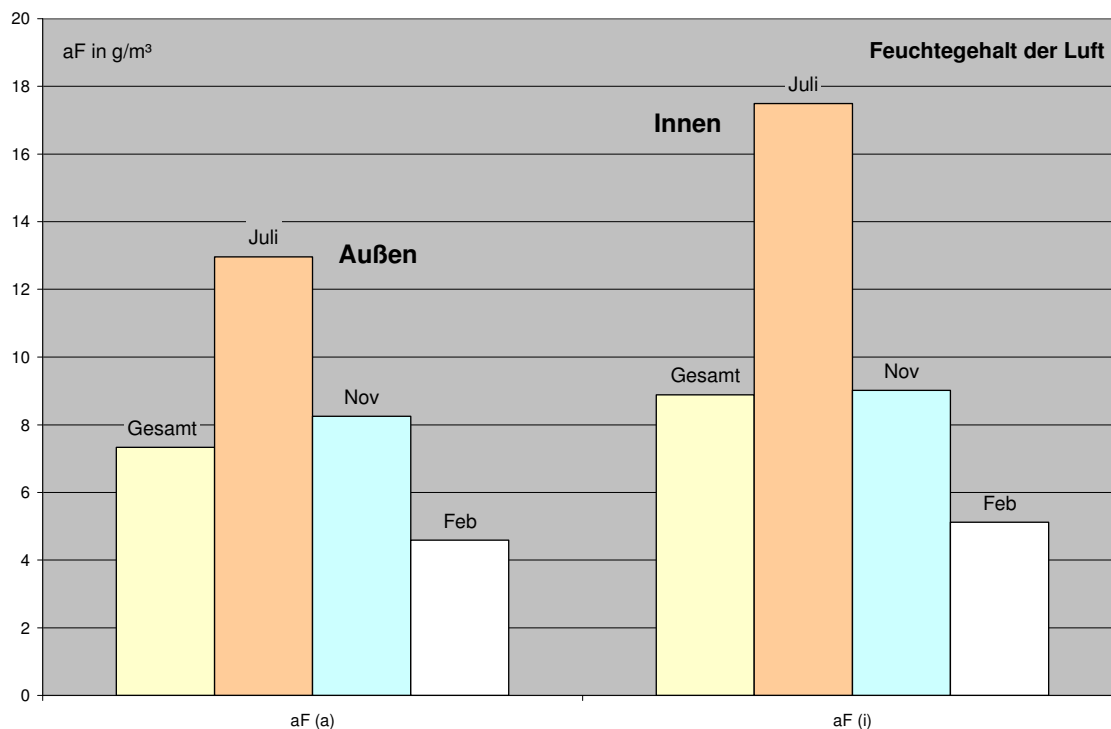


Abb. 62: Absolute Luftfeuchte (Feuchtegehalt), Jahres-Mittelwerte

Die Darstellung der Jahres-Mittelwerte sowie von drei ausgewählten Monaten bestätigt die Aussagen zur erhöhten Innenfeuchte, die vor allem im Sommer ausgeprägt ist.

3.3.3 Zusammenfassung

Temperatur

- exponierte Lage, Himmelsrichtung, Krümmung der Amphore (Einstrahlwinkel) und Windbeanspruchung sind signifikant für örtliche und zeitliche Varianzen auf der Oberfläche
- solare Einstrahlung ist abhängig von Jahres- und Tageszeit
- Verschwärmung hat nur geringen Einfluss auf Temperaturverlauf, da andere Kriterien dominieren (z.B. windgeschützte Lage in Vertiefung, Verschattung)

Gradient der Oberflächentemperatur innen / außen

- messbare Unterschiede sind gering, max. 2 Kelvin
- Temperaturdifferenzen zwischen Innen- und Außenseite zeigen sich vor allem bei starker Zu- strahlung nach kalter Witterung (z.B. Morgensonne nach kalter Winternacht)

Temperaturverlauf zeitlich (Ort konstant)

- Tagesamplitude: ca. 33 Grad [z.B. 12 °C / 45 °C für T(west) im September]
- Jahresamplitude: ca. 60 Grad [z.B. -17 °C / 44 °C für T(süd)]

Temperaturverlauf örtlich (Zeit konstant)

- 20 Kelvin (z.B. 25 °C auf Westseite, 45 °C auf Ostseite, Morgen im Juni)

Jahres-Mittelwerte

- $T(i) = 9,1 \text{ °C}$ und $T(a) = 8,2 \text{ °C}$

Feuchte

- Feuchtebeanspruchung durch tägliche und saisonale Feuchteschwankungen der Außenluft, durch Schlagregen, ablaufendes Wasser und am Sockel stehendes Wasser
- direkter Einfluss von Regenereignissen auf Feuchtegehalt der Luft in der Amphore konnte nicht nachgewiesen werden, zeitverzögerte Einwirkung ist möglich

Jahres-Mittelwerte

- Relative Luftfeuchte (innen und außen): $rF(i) = 92 \%$ und $rF(a) = 84 \%$
- Absolute Luftfeuchte (innen und außen): $aFf(i) = 8,9 \text{ g/m}^3$ und $aF(a) = 7,3 \text{ g/m}^3$

Zum Materialverhalten insgesamt

Die Keramik besitzt eine Rohdichte von annähernd 2.000 kg/m^3 mit entsprechend hoher Wärmeleitfähigkeit sowie einer großen spezifischen Wärmekapazität. Die absolute thermische Speicherwirkung ist aufgrund der Wanddicke von ca. 2 cm eher gering ausgeprägt. Durch die ausgeprägte Wärmeleitung werden Temperaturdifferenzen über die Wanddicke schnell ausgeglichen.

Die hoch gebrannte Keramik ist relativ temperaturbeständig. Das Risiko von Spannungs-Dehnungs-Rissen, die ihre Ursache in den deutlichen Temperaturschwankungen an der äußeren Oberfläche haben, kann aufgrund des schnellen Temperatenausgleiches über den Keramikmantel sowie aufgrund der vergleichbar geringen thermischen Dehnung von Terrakotta und Verfüllmörtel als unkritisch eingeschätzt werden.

Zeitweise bestehen Unterschiede im Feuchteverhalten der Außenluft und der Innenluft in der Amphore. Obwohl die maximalen Temperaturen über den Außentemperaturen liegen, sinkt die relative Luftfeuchte deutlich geringer als die Außenfeuchte. Die Feuchteabgabe aus der Gefäßwandung (Desorption) wirkt dem Absinken der relativen Luftfeuchte entgegen.

Die Dimension der täglichen Feuchteaufnahme/-abgabe liegt im Bereich von ca. 0,5 g, ist also zu vernachlässigen. Die Spannungen durch kurzzeitige Sorptionsvorgänge sind für das Gefüge unkritisch. Die Messergebnisse zeigen eindeutig, dass die Innenfeuchte und die korrespondierende Materialfeuchte ein erhöhtes Feuchteniveau gegenüber der üblichen Ausgleichsfeuchte aufweisen. Der Feuchtegehalt in der Amphore liegt im Jahresmittel um ca. 25 % über der Außenfeuchte.

Es ist davon auszugehen, daß der Verfüllmörtel eine höhere Materialfeuchte aufweist und die Terrakotta an den Austauschvorgängen nur unwesentlich beteiligt und weitgehend trocken ist. Für das ausgeprägte Rissbild der Amphoren sind daher hygrische Quell- und Schwindprozesse des Verfüllmörtels verantwortlich, thermische Einflüsse tragen dabei untergeordnet zur Durchfeuchtung der Verfüllung bei, sind jedoch insgesamt zu vernachlässigen.

4 Terrakottaziergefäße und Probekörper für Reinigungsversuche

4.1 Technologische Beschreibung der Ziergefäße

Nachfolgend werden die vier Modellobjekte vorgestellt, deren Untersuchung in der Werkstatt des Studiengangs Steinrestaurierung der FHP den Ausgangspunkt für die weitere Projektarbeit bildete. Sie gehören ausnahmslos zur Terrakottagattung der Ziergefäße. Der Schwerpunkt der Untersuchungen und auch der nachfolgenden Darstellung liegt bei Modellobjekt 1, da es stellvertretend für eine größere Werkgruppe den Hauptbezugspunkt der weiteren Projektbearbeitung bildete.

Modellobjekt 1: Amphore der Neuen Orangerie Potsdam

Die Neue Orangerie in Potsdam Sanssouci wurde in den Jahren 1851-1860 unter der Regentschaft König Friedrich Wilhelm IV von Persius, Stüler und Hesse erbaut. 1860 fanden auf der Attika des Mittelrisalits 37 große Deckelamphoren ihre Aufstellung. Auch ohne dass schriftliche Belege hierfür vorliegen kann die Herstellung durch die Manufaktur March als sicher gelten, werden doch in einem Katalog der Firma aus dem Jahre 1873 identische Stücke abgebildet.



Abb. 63:
Modellobjekt 1 Terrakottaamphore
Zustand vor Reinigung und Restaurierung



Abb. 64:
Terrakottaamphore aus dem Katalog
der Charlottenburger Tonwarenfabrik
March von 1873; Tafel 33. 206

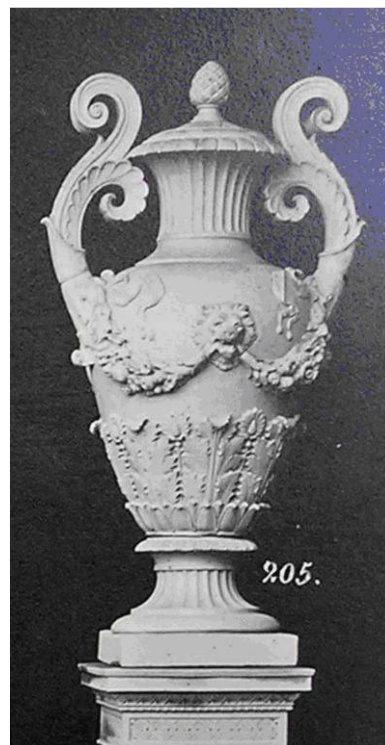


Abb. 65:
Terrakottaamphore aus dem Katalog der
Charlottenburger Tonwarenfabrik March
von 1873; Tafel 33. 205

Die Amphore hat einen cremefarbenen Scherben und bestehen aus den drei Teilen Amphorenfuß, Amphorenkorpus und Amphorendeckel. Der Korpus hat eine Höhe von ca. 96 cm und eine maximale Breite von ca. 67 cm. Zum Amphorenfuß hin und am Amphorenhals weisen sämtliche Amphoren gleich bleibende Schmuckformen auf (Akantusblätterbesatz, Kannelierung und Profilierung der Halspartie), während im Brustbereich zwei verschiedene Motive verwendet wurden: Adler mit Eichen- und Lorbeerzweig oder Löwenkopf mit Festons. Auch die in Form gegenläufiger Doppelvoluten ausgebildeten Henkel sind in 2 Varianten anzutreffen, wobei die ausladender geschwungene Form gleichermaßen in Kombination mit Löwenkopfdeckel und Adlermotiv vorkommt, während die enger am Korpus anliegende Henkelform nur selten und stets in Kombination mit Adlerbesatz auftritt (Abb. 2). Im Inneren mehrerer Amphoren wurde ein senkrecht eingemörtelter Ziegel aufgefunden, der offensichtlich der Verdübelung von Korpus und Amphorenfuß dient.^{16, 17}

Derzeit befinden sich noch 30 Amphoren auf der Attika der Neuen Orangerie, 2 weitere Amphoren gehören zum Depotbestand der SPSSG. Eine davon befand sich als Modellobjekt 1 in der Steinwerkstatt der FHP (Abb. 63). Demnach dürften 5 Amphoren als verloren gegangen gelten.

Als Schadensphänomene an den Amphoren treten auf: Haarrisse, klaffende Risse, Fehlstellen am keramischen Scherben, Fehlstellen in der Verfüugung und Auflagerungen in Form mikrobiologischen Bewuchses und meist unregelmäßig verteilter Verschwärzungen. Bei 7 Amphoren ist die Standsicherheit in Frage gestellt.

Die als Modellobjekt ausgewählte Amphore mit Adlerdekor wies folgende Besonderheiten auf: Amphorenkorpus und Amphorenfuß lagen jeweils in mehreren Fragmenten vor und der Korpus war bis zu etwa einem Drittel seiner Höhe mit Zementmörtel und größeren Ziegelstücken verfüllt. Die Verschwärzungen der Oberfläche waren besonders intensiv.

¹⁶ Röttger (2006) Archivalienrecherche, S. 3-12

¹⁷ Hunger u.a. (2005) Amphorenrecherche, S. 2-4

Modellobjekt 2: Schale



Abb. 66:
Modellobjekt 2



Abb. 67:
Stempelung der inneren
Schalenwandung

Die Schale hat einen cremefarbenen Scherben und besteht aus zwei Teilen, Schalenfuß auf quadratischer Plinthe und Schalenkörper. Die Gesamthöhe beträgt 38 cm, der Durchmesser 57 cm. Aufgrund einer in der Schale befindlichen Stempelung ist eine eindeutige Zuordnung zum Keramikproduzenten March

gegeben. Die dem Depot der SPSG entnommene Schale dürfte einem Ensemble von ursprünglich 10 Schalen zuzuordnen sein, die das Albanische Gitter zieren, das den Vorgarten der Römischen Bäder umschließt.¹⁸

Modellobjekt 3: gelbe Vase



Abb.68: Modellobjekt 3

Das zweiteilige Objekt besteht aus einem kannelierten Vasenfuß mit kreisrunder Standfläche und einem kelchartig sich erweiternden Vasenkörper mit ausragenden Profilierungen an Korpuslippe und am unteren Korpusrand. Der Vasenkörper ist mit einem Ornamentband mit Lilien- bzw. Palmettenmotiv im Flachrelief geschmückt. Die Gesamthöhe beider Teile beträgt 57 cm, der maximale Durchmesser 46 cm. Der einheitliche Scherben des Vasenfußes weist eine gelbliche Brennfarbe auf, während am Vasenkörper unter einer gelblichen Behautung einen etwas rötlicheren Grundscherben zu erkennen ist. Hinweise auf den Hersteller, etwa in Form einer Stempelung, liegen nicht vor. Als ehemaliger Aufstellungsort kommt eine Mauer nördlich der 1841/42 von Persius umgebauten Neuen Kammern in Betracht.¹⁹

Modellobjekt 4: rötliche Vase



Abb. 69: Modellobjekt 4

Die Vase entspricht in Maßen und Formgebung exakt dem Modellobjekt 3. Sie unterscheidet sich jedoch durch die rötlichere Brennfarbe des einheitlichen Scherbens von Vasenfuß und -körper.

4.2 Technologische Beschreibung der Probekörper für Reihenversuche

Systematische, vergleichende Untersuchungen verschiedener Reinigungsverfahren, Reinigungsmittel und Reinigungsparameter setzen die Bereitstellung keramischer Oberflächen als zu reinigendes Substrat in ausreichender Größe bzw. Anzahl und in geeigneter Beschaffenheit voraus. Wegen zu erwartender Schäden im Zuge von Reinigungsversuchen und aufgrund des Flächenbedarfs konnten die Reihenversuche nicht oder nur eingeschränkt an den wertvollen Modellobjekten selbst erfolgen.

Es war daher eine möglichst homogene Gruppe von Keramikobjekten als Probekörper erforderlich, die den Modellobjekten hinsichtlich Scherbeneigenschaften und Schmutzauflagerungen möglichst gleichen sollten. Hierfür geeignet erschienen bereits demontierte Elemente von Albanischen Gittern, die ebenfalls aus dem Schlosspark Sanssouci in Potsdam stammen.²⁰ Es ist anzunehmen, daß sie wie die weiter oben beschriebenen Modellobjekte in der 2. Hälfte des 19. Jhs. gefertigt wurden. Es handelt sich um stereometrische Körper in Form halbiertes Zylinder mit rotem (orangebraunem) oder gelbem (cremefarbenem) Scherben und variierenden Abmessungen: Die gelben Elemente weisen Außendurchmesser von 13,5 bis 15 cm, eine Tiefe von 11,5-12 cm und eine auch innerhalb einzelner Elemente variierende Scherbendicke von 1,7 bis 2,3 cm auf. Die roten Elemente sind mit einem Außendurchmesser von ca. 17,5 cm einer Tiefe von 10 cm und einer Scherbendicke von 1,5 – 2 cm durchgängig schlanker proportioniert. Die vari-

¹⁸ Sängler u.a. (2003), Projektarbeitsbericht, S. 6 u. 8

¹⁹ Sängler u.a. (2003), Projektarbeitsbericht, S.

²⁰ Die Elemente waren auf einer Terasse neben dem Felsentor gelagert, Sängler u.a. (2003), Projektarbeitsbericht, S. 51

ierenden Maße und Brennfärbungen sprechen für unterschiedliche Verwendungszusammenhänge und damit auch für eine größere Zeitspanne hinsichtlich ihrer Herstellung.

Es standen insgesamt 37 rote und 43 gelbe Elemente zur Verfügung. Die Oberflächen weisen dunkle, filmartige Schmutzauflagerungen variierender Intensität und Gleichmäßigkeit und sowie teilweise Reste von Versetzmörtel auf (Abb. 70).²¹

Die Elemente wurden vor Beginn der Reinigungsversuche unter besonderer Berücksichtigung von Dichte und Gleichmäßigkeit der anhaftenden Auflagerungen in Gruppen ähnlicher Eigenschaften eingeteilt und hinsichtlich ihrer Eignung für die Reinigungsversuche bewertet. Oberflächen mit besonders dünnen oder ungleichmäßigen Auflagerungen wurden für orientierende Vorversuche verwendet. An Flächen mit gleichmäßigen und relativ dunklen Auflagerungen wurden nachfolgend die systematischen Reinigungsversuche und Bewertungen vorgenommen. Hierzu wurden auf den Elementen Flächen in den Abmessungen von ca. 5 cm * 4,5 cm oder in vergleichbarer Größe selektiert und vor Ausführung der Reinigung mittels Kreppklebeband freigestellt (Abb. 71).



Abb. 70: Elemente eines Albanischen Gitters als Probekörper für Reinigungsversuche

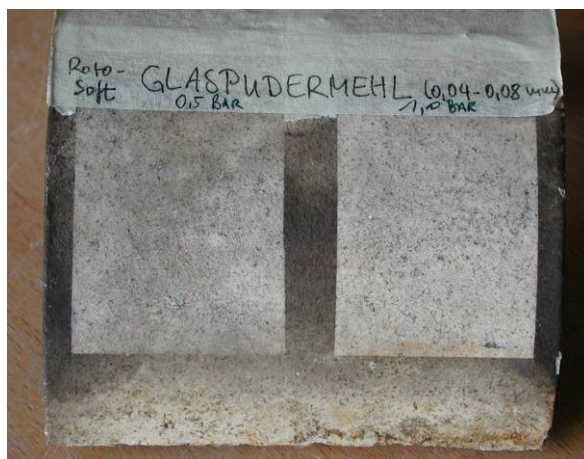


Abb. 71: Reinigungsfelder auf einem Gitterelement

Um die Übertragbarkeit der an den Elementen des Albanischen Gitters erzielten Ergebnisse auf die Werkgruppe der Terrakottaamphoren der Neuen Orangerie Potsdam sicherzustellen, wurden zusätzlich orientierende Reinigungsversuche an Bruchstücken des Amphorenfußes von Modellobjekt 1 vorgenommen (Abb. 72). Dabei ging es auch um die Erzielung orientierender Ergebnisse zu der Frage, wie sich einzelne Reinigungsverfahren, -mittel und -parameter bei der Reinigung gekrümmter, komplex geformter Objekte mit Kanten, Unterschnidungen und schwer zugänglichen Vertiefungen bewähren. Mit ausgewählten Reinigungsverfahren wurden nachfolgend systematische Versuche auf Feldern von ca. 3,2 x 6,5 cm Größe angelegt und bewertet (Abb. 73).



Abb. 72: Bruchstücke 2 (links) und 6 (rechts) des Amphorenfußes mit Reinigungsvorproben



Abb. 73: Bruchstück 1 des Amphorenfußes mit Testfeldern systematischer Reinigungsversuche

²¹ Sanger u.a (2003) Projektarbeitsbericht, S. 51 f.

4.3 Materialkundliche Charakterisierung der Ziergefäße und Probekörper

4.3.1 Untersuchungsmethoden

An der MPA Bremen wurden folgende Untersuchungen an je einer Probe der Modellobjekte 1-4 und an einem gelben Element des Albanischen Gitters durchgeführt:

- Materialanalytische Untersuchungen von Scherben, Auflagerungen und Mörteln mittels Polarisationsmikroskopie, Raster-Elektronenmikroskopie (REM) und energiedispersiver Mikroanalyse (EDX) an polierten Dünnschliffen und an Oberflächen
- Bestimmung physikalischer Kennwerte des Scherbens und der Mörtelfüllung von Modellobjekt 1 (Amphore Neue Orangerie):
 - Wasseraufnahme, Rohdichte, offene Porosität
 - Druckfestigkeit und dynamischer E-Modul
 - hygrische und thermische Dehnung

Im Studiengang Steinkonservierung der FHP wurden u. a. folgende Untersuchungen an den Modellobjekten und z.T. auch an Elementen des albanischen Gitters vorgenommen:

- Schadenskartierung an den Modellobjekten 1-4
- Messung der kapillaren Wasseraufnahme mit Messröhrchen nach Karsten
- Messung der kapillaren Wasseraufnahme mittels Wassertropfeneindringtest
- Messung der Luftpermeabilität
- Mikroskopische Untersuchungen an Querschliffen und Dünnschliffen
- Untersuchungen der Oberflächen mit bloßem Auge und Stereomikroskop
- Nasschemische Untersuchungen der Schmutzauflagerungen

Die genannten Verfahren wurden teilweise auch zur Zustandscharakterisierung nach der Durchführung von Reinigungsversuchen angewendet.

Herr Grzimek (Golem GmbH) leitete aus einer phänomenologischen Begutachtung der Amphore (Modellobjekt 1) Erkenntnisse zum Herstellungsverfahren und dessen Einfluss auf den derzeitigen Zustand der Werkgruppe der Amphoren der Neuen Orangerie ab.

4.3.2 Charakterisierung des Modellobjekts 1 (Amphore)

Fertigungstechnologie²²

Die Amphoren wurden zweifellos seriell gefertigt. Zunächst wurde ein Urmodell hergestellt, von dem eine Gipsstückform abgenommen wurde. Einzelne Teile, wie z.B. die Henkel oder stark unterschrittene Schmuckapplikationen, wurden separat ausgeformt und in lederhartem Zustand an den Korpus angarniert. Nach der Trocknung wurden die Amphoren bei Temperaturen zwischen 1200 und 1250 °C im holz-beheizten Kammerofen gebrannt.

Keramischer Scherben und dessen physikalische Eigenschaften²³

Der im Dünnschliff nahezu farblose Scherben von homogener Textur weist überwiegend quarzitisches Zuschläge bis 0,7 mm Größe auf. Eine Engobierung oder Behautung ist nicht zu erkennen. Jedoch weist der Scherben in Oberflächennähe eine herstellungsbedingte Gefügeverdichtung auf. Im übrigen Scherbenquerschnitt liegt ein relativ hoher Anteil lichtmikroskopisch sichtbarer Poren von meist länglicher Form vor, die eine oberflächenparallele Einregelung erkennen lassen. Gipseinlagerung im Gefüge sind nicht festzustellen.

²² Grzimek (2006) Gedanken aus baukeramischer Sicht

²³ Schlütter (2004) 1. Untersuchungsbericht, S. 3 f. u. S. 12

Physikalische Eigenschaften an Modellobjekt 1 (Amphore)²⁴:

Kennwert	Einheit	Amphorenkörper	Amphorenfuß	Mörtelfüllung
Probenbezeichnung		S. 7.1/1	S 7.1/2; S 7.1/3	S 7.1/4
Rohdichte	g/cm ³	1,99	1,98	1,91
Offene Porosität	Vol.-%	10,9	10,3	20,0
Wasseraufnahme	M.-%	5,5	5,2	10,5
Druckfestigkeit	N/mm ²	-	41,7	-
Dynamischer E-Modul	kN/mm ²	35,4	31,4	21,9
Feuchtedehnung	µm/m	27	20	262
Thermische Dehnung	µm/m*K	13,2	21,7	26,8

Auflagerungen, physikalische Eigenschaften der Scherbenoberfläche und spezifische Schäden²⁵

Die grau-schwarzen, filmartigen Auflagerungen (thin black layers) weisen wechselnde Dicken von 5 bis 20 µm, stellenweise bis 80 µm auf. Sie bestehen überwiegend aus mineralischen Partikeln, wobei die dunkle Färbung von sulfidischen Verbindungen diverser Metalle herrührt. Die Auflagerungen sind vermutlich durch amorphe Kieselsäure gebunden. Sie enthalten kein Gips, keine leicht löslichen Salze und nur in lokalen Vertiefungen organische Anteile. Die Auflagerungen stellen umweltbedingte Veränderungen der Objektoberflächen dar und weisen einen guten Verbund mit dem keramischen Scherben auf. Messungen der kapillaren Wasseraufnahme und der Luftpermeabilität ergaben, dass die Objektoberflächen und Bruchflächen praktisch wasser- und gasdicht sind, und zwar unabhängig vom Verschmutzungsgrad, d.h. sowohl mit als auch ohne Auflagerungen.²⁶

Ergebnisinterpretation

Es handelt sich bei der Amphore anscheinend um dicht gebrannte, gut witterungsbeständige Steinzeugware von insgesamt homogener Struktur, wenngleich der Scherben in Oberflächennähe wohl herstellungsbedingt eine dichteres Gefüge aufweist, ohne jedoch engobiert zu sein. Diese als Brennhaut interpretierbare Phänomen mag den scheinbaren Widerspruch zwischen dem für einen Steinzeugscherben recht hohen Porenanteil und der faktisch wasser- und gasdichten Oberfläche der Amphore erklären, während eine verwitterungsbedingte Abdichtung der oberflächennahen Porenraums mit Gips nicht vorliegt und damit als mögliche Erklärung ausscheidet. Die fest anhaftenden, dunklen Oberflächenauflagerungen tragen zusätzlich zur Abdichtung der Oberfläche bei. Sie weisen eine quarzitische bzw. silikatische Bindung auf, die sich vermutlich aus gelösten Kieselsäurebestandteilen des Scherbens gebildet hat

4.3.3 Charakterisierung der Modellobjekte 2-4 (Schale und Vasen)

Die Scherben weisen Unterschiede in der Größe der Magerungskörnung und im Gehalt an färbenden Eisenoxiden auf. Die beiden Vasen erscheinen bei lichtmikroskopischer Betrachtung deutlich dichter und feinkörniger als die anderen Terrakotten. Eine Mehrlagigkeit des Scherbens, die auf Werkprozesse wie Engobierung oder Ausschlickern der Gipsformen (Behautung) zurückzuführen wären, sind an den Dünnschliffen nicht nachzuweisen. Allen 3 Objekten sind jedoch Gipshorizonte mit einer Mächtigkeit zwischen 100 und 600 µm unmittelbar unter der Oberfläche gemeinsam, die sich an der Amphore (Modellobjekt 1) nicht nachweisen ließen. Es handelt sich eindeutig um umweltbedingte Gipsanreicherungen, die zu einer zusätzlichen Abdichtung der Objektoberflächen führen und somit als Vorschädigung zu werten sind. An Bruch-, Fugen und Standflächen der beiden Vasen (Modellobjekt 3 und 4) war eine relativ langsame kapillare Wasseraufnahme zu beobachten, während die originalen Sichtflächen wie auch sämtliche Oberflächen von Modellobjekt 2 keine Wassereindringung aufwiesen. An Fugen- und Standflächen aller drei Objekte ließ sich zudem eine geringfügige Luftpermeabilität feststellen.

²⁴ Schlütter (2005) 2. Untersuchungsbericht, S. 3 f.; Die angegebene Messwerte sind Einzelmesswerte, lediglich der ausgewiesene Druckfestigkeitswert ist ein Mittelwert aus 3 Einzelmessungen

²⁵ Schlütter (2004) 1. Untersuchungsbericht, S. 3 f.

²⁶ Sänger u.a. (2003) Projektarbeitsbericht, S. 17-22; Kartierung im Anhang

4.3.4 Charakterisierung der Elemente Albanisches Gitter

Die Gitterelemente wurden vermutlich, ähnlich wie bei der Fertigung von Firstsiegeln, aus handgestrichenen Tonplatten über einer Model geformt, jedoch ist auch eine Herstellung mittels Strangpresse nicht auszuschließen.²⁷ Zu den physikalischen Eigenschaften des Scherbens liegen keine Erkenntnisse vor. Die mikroskopische Betrachtung von Probematerial eines cremefarbenen Elementes ergab hinsichtlich der Scherbenfarbigkeit, der Magerung, die überwiegend aus Quarzkörnern gebildet wird (bei etwas größerer Körnung bis maximal 0,9 mm) gebildet wird, und des relativ hohen Anteils sichtbarer Poren von länglicher, oberflächenparallel eingeregelter Form große Ähnlichkeit des Scherbens mit Modellobjekt 1 (Amphore) und 2 (Schale).²⁸ Wie bei der Amphore liegen darüber hinaus keine Gipshorizonte in Oberflächennähe vor. Gleichwohl ist eine herstellungsbedingte Verminderung der Porosität in dieser Zone festzustellen, jedoch keine Engobierung oder Behautung.²⁹ Die Schmutzauflagerungen unterscheiden sich dagegen deutlich von den Modellobjekten: In ihnen ist kaum Silizium nachweisbar. Vielmehr handelt es sich um Auflagerungen organischen Ursprungs, die sich vorzugsweise in Vertiefungen und Rauigkeiten geschützter Oberflächen gebildet haben. Oberflächen mit und ohne Auflagerungen sind gleichermaßen wasser- und gasdicht. Die roten Gitterelemente wurden nicht näher untersucht.

4.3.5 Zusammenfassung und Schlußfolgerung

Die Frage, ob einzelne Objekte dünne keramische Überzüge aufweisen (Behautung, Engobe), ließ sich nicht für alle Objekte abschließend klären. Die Aussagekraft der mikroskopischen Analyseergebnisse ist durch Untersuchung von nur einer Probe je Objekt eingeschränkt. Beobachtungen an Modellobjekt 3 (gelbe Vase) stehen jedenfalls im Widerspruch zum dünnschliffmikroskopischen Befund.

Die Modellobjekte 2 bis 4 unterscheiden sich v. a. durch ausgeprägte Gipshorizonte unterhalb der Scherbenoberfläche von Modellobjekt 1, z.T. auch durch Struktur und Textur des keramischen Scherbens. Die Auflagerungen der vier Modellobjekte gleichen sich dagegen. Gleichwohl stellt sich bei den Modellobjekten 2 bis 4 neben der Beseitigung von Oberflächenauflagerungen zusätzlich das Problem, ob und ggf. wie die Gipseinlagerungen im oberflächennahen Gefüge zu entfernen sind. Diese Fragestellung, die gleichermaßen dem Themenkomplex Entsalzung zuzuordnen ist, konnte im Rahmen des Forschungsprojektes nicht bearbeitet werden.

Die Ergebnisse der mikroskopischen Analysen weisen eine gute Übereinstimmung in der Scherbenstruktur und –textur von Modellobjekt 1 (Amphore) und einem Element des Albanischen Gitters auf. Auch ist Gips bei beiden untersuchten Proben weder oberflächennah im Gefüge noch in den Auflagerungen nachzuweisen. Allerdings bestehen deutliche Unterschiede in der Art der Auflagerungen: silikatische Bindung bei der Amphore, Auflagerungen organischen Ursprungs bei dem Gitterelement.

Trotz der Unterschiede in den Auflagerungen war die Objektgruppe der Gitterelemente für orientierende und systematische Reinigungsversuche unverzichtbar und ihre Eignung für diesen Zweck nicht in Frage gestellt, sofern die Übertragbarkeit der Reinigungsergebnisse an den Gitterelementen auf die Werkgruppe der Amphoren durch zusätzliche Versuche auf Bruchstücken des Amphorenfußes (Modellobjekt 1) sichergestellt wurde.

5 Versuchsaufbau zur Eignungsbeurteilung ausgewählter Reinigungsverfahren

5.1 Übersicht zu möglichen Reinigungsverfahren für Terrakotta

Die Vielzahl möglicher Reinigungsverfahren für Bauterrakotta lassen sich in folgende Gruppen einteilen:

- Partikelstrahlverfahren

Als Untergruppe mechanischer Reinigungsverfahren beruhen Partikelstrahlverfahren auf der abrasiven Wirkung mehr oder weniger feinkörniger Strahlgüter, die mittels Druckluft und/oder Wasser auf die zu reinigende Oberfläche geschleudert werden. In Abhängigkeit vom Durchmesser der Düsenaustrittsöffnung und damit der Flächengröße des auf das Objekt einwirkenden Strahlungsfeldes unterscheidet

²⁷ Grzimek (2006) Gedanken aus baukeramischer Sicht

²⁸ Schlütter (2004) 1. Untersuchungsbericht, S. 3

²⁹ Schlütter (2004) 1. Untersuchungsbericht, S. 40

man Feinstrahlverfahren mit geringer Flächenleistung für differenziertes Arbeiten an Bildwerken und plastischen Architekturdetails und Partikelstrahlverfahren mit größerer Flächenleistungen für die Reinigung von Fassaden. Wird ohne Wasserzusatz gearbeitet, spricht man von trocken-abrasiven Verfahren, dagegen bei Verwendung von Wasser von feucht-abrasiven Strahlmethoden. Ferner stehen in beiden Kategorien Verfahrensalternativen zur Verfügung, bei denen das Strahlgut – zumindest nach Angabe der Gerätehersteller - nicht frontal sondern tangential-rotierend auf die Objektoberfläche auftrifft.

- Feuchtreinigungsverfahren
In dieser Verfahrensgruppe übernimmt meist Wasser als stark polare Verbindung in flüssiger, nebel- oder dampfförmiger Form die Rolle, Auflagerungen zu benetzen, anzuquellen, anzulösen und wegzuschwemmen. Bei den Kurzzeitverfahren wie Hochdruckwasserstrahlen oder Heißdampfstrahlen wird zur Steigerung der Reinigungswirkung mit hohen Drücken, erhitztem Wasser oder mit Wasserdampf gearbeitet. Dem gegenüber beruhen Wasserebelverfahren und Berieselung auf längeren Einwirkungszeiten von Wasser bei Normaldruck und Normaltemperatur. Dies gilt auch für Wasserkompressen, deren Besonderheit in der Minimierung des Wassereintrags in das Gefüge liegt. Weitere Möglichkeiten eröffnen sich durch die Kombination von Wasser mit Lösemitteln wie z.B. Alkoholen, um die Benetzung von Auflagerungen zu verbessern.
- Kombinationsverfahren
Viele Feuchtreinigungsverfahren, insbesondere Kompressenanwendungen, werden mit mechanischen Reinigungsverfahren kombiniert, da die zu entfernenden Auflagerungen meist nur angequollen und aufgeweicht, aber erst durch mechanische Einwirkung abgetragen werden können bzw. ein mechanischer Entfernung von Ablagerungen durch eine Vorbehandlung mit Wasser effektiver und schadensärmer werden kann. Es sind vielfältige Kombinationen der oben aufgeführten Feuchtreinigungsverfahren mit nachfolgenden mechanischen Verfahren wie Abbürsten, Kratzen, Schaben oder Partikelstrahlen möglich.
- Chemische Reinigungsverfahren
Chemischen Reinigungsverfahren beruhen auf Wechselwirkungen sonst nur schwer oder gar nicht löslicher Bestandteile von Auflagerungen mit Reinigungsagenzien wie Säuren, Laugen oder Komplexbildnern in wässrigen Systemen. Ihre zielgerichtete Auswahl setzt in der Regel Kenntnis der chemischen Zusammensetzung der zu entfernenden Auflagerungen voraus. Während Chemikalien zur Gipsumwandlung in der Restaurierung häufig Anwendung finden, werden alkalische oder saure Reinigungsmedien wegen damit verbundener Gefahren wie Salzbildung in Deutschland meist skeptisch beurteilt, gleichwohl in der handwerklichen Fassadensanierung häufig eingesetzt.
- Laserstrahlverfahren
Laserstrahlung wird seit mehr als 10 Jahren zur Reinigung von Denkmalobjekten aus Stein angewendet und in seiner Wirkung intensiv untersucht.³⁰ Das mechanisch berührungsfreie Verfahren ermöglicht bei Wahl adäquater Einstellungen häufig eine zerstörungsfreie Reinigung selbst äußerst fragiler Objektbereiche, sofern hinreichende Unterschiede in der Lichtabsorption von Auflagerung und zu reinigender Objektoberfläche gegeben sind. Die Reinigungswirkung beruht im wesentlichen auf der kurzzeitiger Erhitzung und Verdampfung der Auflagerungen.

5.2 Ausgewählte Reinigungsverfahren

Die Auswahl der untersuchten Reinigungsverfahren basiert v. a. auf Literaturberichten zur Reinigung von Terrakotta, Ziegel und Naturstein und persönlichen Erfahrungen der Beteiligten im Studiengang Steinrestaurierung der FHP. Ferner spielte auch die Verfügbarkeit der entsprechenden Reinigungs-technik eine Rolle und die Frage, wie (un-)populär einzelne Verfahren eingeschätzt wurden. Denn die Reinigungsverfahren sollten auch der Überprüfung von „Reinigungsmoden“ und tabuisierten Verfahren dienen. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf den Partikelstrahlverfahren.

5.2.1 Trocken-abrasives Feinstrahlverfahren

Mikropartikelstrahlen gilt als ein sehr substanzschonendes Reinigungsverfahren, mit dem bei entsprechender Strahlmittelwahl und auf das Objekt angepassten Strahlparametern Auflagerungen ohne oder mit nur minimaler Beschädigung der Objektoberflächen ausgedünnt oder entfernt werden können. Entscheidend für die gute Kontrollierbarkeit der Abrasionswirkung sind v. a. niedriger Strahldruck, geringe

³⁰ Vergès-Belmin (1996) Laser für die Reinigung von Notre-Dame in Paris?
Siedel u.a. (2005) Laserstrahlreinigung von Natursteinoberflächen

Austrittsöffnungen der Strahldüsen und damit geringe Größe des Strahlfeldes, was andererseits eine geringe Flächenleistung bewirkt. Das entsprechend zeitintensive Verfahren wird bei der Reinigung wertvoller Steinobjekte und verwandter Materialien sehr häufig und seit mehreren Jahrzehnten eingesetzt. Neben den Einflüssen des zu reinigenden Substrats und seiner Auflagerungen sowie der Strahlmittel hängen Reinigungsgrad, Reinigungsgeschwindigkeit und Schädigungspotential von folgenden Verfahrensparametern ab:

- Austrittsöffnung der Düse
- Strahldruck, seinerseits durch folgende Faktoren beeinflusst:
 - Regelbarer Betriebsdruck im Gerät
 - Abstand der Düse zum Objekt
- Strahlmitteldurchsatz
- Strahldauer
- Auftreffwinkel des Strahlgutes auf der Oberfläche

Im Mittelpunkt der Reinigungsversuche stand der Vergleich unterschiedlicher Strahlgüter, untergeordnet auch der Einfluss von zwei verschiedenen Strahldrücken. Es wurde das Gerät Sandmaster FG 1-93 verwendet.³¹ Standardmäßig wurden Düsen mit einem Durchmesser von 1,2 mm verwendet. Alle Strahlgüter wurden mit Strahldrücken von 0,5 und 1 bar, nur ausnahmsweise auch bei höheren Drücken getestet (jeweils abgelesen am Gerätemanometer). Der Abstand zwischen Düse und Objektoberfläche wurde in den Grenzen 0,5 bis 12 cm variiert und betrug meistens 1-4 cm. Die Veränderung des Arbeitsabstandes, wie sie auch in der Praxis am Objekt üblich ist, erwies sich als notwendig, um mit unterschiedlichen Strahlgütern bei sonst identischen Strahlparametern vergleichbare Reinigungsergebnisse zu erzielen. Auch die erforderliche Reinigungsdauer variierte strahlgutabhängig. Sie wurde erfasst und kann damit in die Beurteilung einfließen.

5.2.2 Rotationsstrahlverfahren

Als Alternative zur konventionellen Strahltechnik mit Venturidüse, bei der das Strahlgut frontal auf die Objektoberfläche auftrifft, stehen heute mehrere Düsentypen zur Verfügung (JOS, Rotec, Roto-Soft), die die Strahlpartikel mit oder ohne Wasserzusatz in Rotation versetzen, wodurch die Partikel tangential, mit schleifender Wirkung auf die Objektoberfläche auftreffen sollen. Rotationsstrahlverfahren werden in verschiedenen Studien bei angepasster Strahlmittelwahl und adäquaten Strahlparametern eine sehr gut kontrollierbare und äußerst schonende Wirkung bescheinigt.³²

Das älteste dieser Verfahren ist das ausschließlich feucht-abrasiv arbeitende JOS-Rotationsstrahlverfahren, das im Studiengang Steinrestaurierung der FHP verfügbar ist. Von den verschiedenen Düsen mit unterschiedlicher Flächenleistung wurden für die Reinigungsversuche die Piccolodüse mit einer Düsenöffnungsnennweite von 3 mm verwendet. Als Strahlanlage diente ein 24 Liter-Niederdruckstrahlgerät der Firma Radler und Ruf mit Rüttler zur gleichmäßigen Strahlmitteldosierung. Es wurde mit Strahldrücken von 0,5 und 1 bar (jeweils abgelesen am Gerätemanometer) gearbeitet. Auch bei diesem Verfahren wurde der Abstand zwischen Düse und Objektoberfläche in den Grenzen 5-10 cm abhängig von der Reinigungswirkung verändert. Die Druckluft wurde zu gleichen Teilen in den Strahlgutbehälter und an diesem vorbei geleitet (Hebelstellung ‚halbacht‘). Bei der Auswahl der Strahlmittel wurde auf die Ergebnisse der Reinigungsversuche mit dem trocken-abrasiven Mikrosandstrahlverfahren zurückgegriffen und zur Begrenzung des Untersuchungsaufwandes nur mit einem Teil der Strahlgüter gearbeitet.

Die Einbeziehung weiterer, wahlweise trocken-abrasiv oder feucht-abrasiv einsetzbare Rotationspartikelstrahlverfahren (Rotec, Roto-Soft) in die systematischen Reinigungsversuche war leider nicht möglich, da die entsprechenden Düsen nicht zur Verfügung standen.

5.2.3 Untersuchte Strahlmittel

Die verwendeten Strahlmittel mit ihren wichtigsten Eigenschaften und der jeweilige Verwendungszusammenhang sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst. Weitere technischen Informationen zu den einzelnen Strahlgütern sind in Kapitel 12 aufgeführt.

³¹ Technische Angaben s. Kap.12

³² Grassegger FMFA-Stuttgart (1998) Untersuchungsbericht Rotec; Werner IBB-Aachen (1988 u. 1991) JOS-Verfahren; Habermann (1991) Fassadenwäsche Regensburger Dom

Verwendete Strahlmittel:

Strahlgut – bezeichnung	Abkürzung	Bezugs- quelle	Eigenschaften (Hersteller- angaben)			Mikropartikelstrahlen				JOS- Ver- fahren	Kombi- nati- ons- ver- fahren
			Partikel- größe [µm]	Parti- kel- form	Mohs härte	2003	2004	2005	2006		
Edelkorund F 360	EK 360	Hasenfratz	20 – 23	kantig, kubisch	9	X					
Edelkorund F 600	EK 600	Hasenfratz	8 – 10	kantig, kubisch	9	X		X		X	X
Glasbruch Nr. 54	GB 54	Hasenfratz, Strahlgas	250 – 500	kantig	6 – 7	X					
Glasbruch Nr. 100	GB 100	Hasenfratz, Strahlgas	110 – 210	kantig	6 – 7	X					
Glasperlen Nr. 6	GP 6	Hasenfratz	90 – 150	rund	6 – 7	X					
Glasperlen Nr. 9	GP 9	Hasenfratz	10 – 50	rund	6 – 7	X					
Hohlglaskugeln S 22	HGK	Kremer	<20-75	rund	k.A.	X	X				
Bodenkalk	BK	unbekannt	300 – 1000	rund	3 – 3,5	X	X				
Granatsand Garnit-Soft	GS	Kominex	10 – 60	kantig, kubisch	7,5 – 8		X			X	
Edelkorund F 1200	EK 1200	Hasenfratz	2,3 – 3,9	kantig, kubisch	9			X			
Rotosoft- Gaspuder- mehl microfein	GPM	Weisenbur- ger GmbH	40 – 80	kantig	6 – 7			X	X	X	
Rotosoft- Steinpudermehl	SPM	Weisenbur- ger GmbH	5 – 300	kantig, kristal- lin	3 – 3,5			X		X	
Weichstrahlmittel S (Naturalblast)	WSS	Hasenfratz	100 - 250	kantig	2,5				X	X	

5.2.4 Kombinationsverfahren: Partikelstrahlen nach vorheriger Durchfeuchtung der Auflagerungen

Aufgrund der silikatischen Bindung der Auflagerungen auf den Modellobjekten war bei alleiniger Anwendung von Feuchtreinigungsverfahren nur mit einem geringen Reinigungseffekt zu rechnen. Vorversuche mit reinen Wasserkompressen und Heißdampf an den Gitterelementen bestätigten dies. Aussichtsreicher erschien es dagegen, das Potential kombinierter Verfahren näher auszuloten, um Partikelstrahlverfahren mit ausgewählten Strahlmitteln und Strahlparametern durch eine vorausgehende Durchfeuchtung der zu entfernenden Auflagerungen noch schonender und effektiver zu gestalten. Zur Durchfeuchtung dichter, fest anhaftender Auflagerungen erschienen vor allem solche Feuchtreinigungsverfahren geeignet, bei denen das Wasser als Nebel oder in der Dampfphase auf das Objekt trifft. Zur feinsten Zerstäubung des Wassers werden bei Restaurierungsarbeiten in Italien häufig sogenannte Nebulizzatoren verwendet.³³ Das Verfahren beruht auf der Erzeugung eines Sprühnebels mittels Düsen, denen Wasser und Druckluft zugeführt wird. Wie in Abb. 74 ersichtlich handelt es sich bei dem verwendeten Apparat um ein relativ einfache Vorrichtung mit 4 Düsen, bei der sich Luft- und Wasserdruck getrennt voneinander regeln lassen. Alle Versuche wurden mit 1 bar Wasserdruck und 3 bar Luftdruck vorgenommen. Der Düsenabstand zum Objekt betrug ca. 5 cm.

³³ Mündl. Mitteilung von Prof. Gottfried Hauff

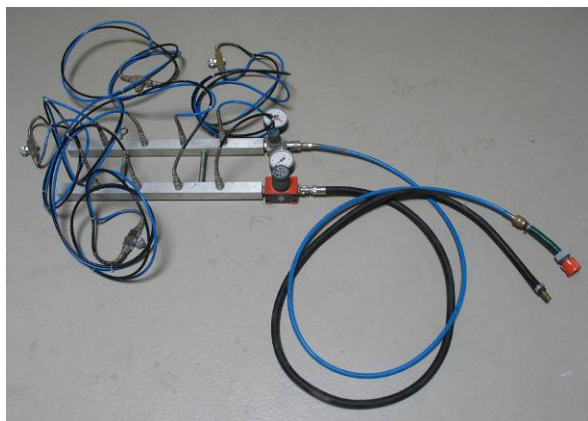


Abb. 74: Nebulizzatore mit Druckluft- und Wasseranschluss, Druckminderern, Manometern und Düsen



Abb. 75: Nebulizzatore: Düse mit Druckluft- und Wasserzufuhr

Zur Erzeugung von Heißdampf wurde das Gerät Supersteam der Fa. Reitel verwendet. Vergleichend wurden auch Reinigungsversuche mit Wasser- oder Wasser-Ethanol-Kompressen durchgeführt.

Bei allen Verfahrenskombinationen lag der Untersuchungsschwerpunkt auf dem Vergleich verschiedener Befeuchtungsverfahren und – untergeordnet – dem Einfluß der Einwirkungsdauer auf das Reinigungsergebnis.

5.2.5 Chemische Verfahren 1: Ammoniumcarbonat, Ionenaustauscharze und Komplexbildner

Analyseergebnisse zur Zusammensetzung der Auflagerungen an den Modellobjekten und Gitterelementen lagen zum Zeitpunkt der Erprobung chemischer Reinigungsmethoden noch nicht vor. Die Auswahl der nachfolgend aufgeführten chemischen Reinigungsmittel basierte noch auf der Annahme eines relevanten Gipsanteils in den zu entfernenden Auflagerungen, wie er an vielen Naturstein- und Terrakottaobjekten häufig anzutreffen ist.

Es wurden folgende chemische Präparate erprobt:³⁴

- Ammoniumcarbonat ($(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$)
- Akeogel A 1500 der Fa. Syremont (Italien), ein basischer Anionenaustauscher mit OH^- -Belegung
- Powdex GX 113, Fa. Graver Technologies (USA), ein basischer Anionenaustauscher mit CO_3^{2-} -Belegung
- Amberlite IRA 402 der Fa. Rohm und Haas, ein saurer Kationenaustauscher mit H^+ -Belegung
- AB 57, Reinigungspaste nach Mora
- Ethylendiamintetraessigsäure (EDTA)
- Thioglycolsäure

5.2.6 Chemische Verfahren 2: Reinigungsmittel auf der Basis von Flußsäure

Flußsäure ist in vielen kommerziellen Reinigungskonzentrat enthalten und führt bei vergleichsweise geringem Zeitaufwand häufig zu ästhetisch zufriedenstellenden Reinigungsergebnissen. Die Reinigungswirkung beruht im Wesentlichen auf dem Lösungsvermögen von Fluorwasserstoffsäure für fast alle mineralischen Stoffe einschließlich Siliziumverbindungen, die meist gleichermaßen in den Auflagerungen und in der Substanz der zu reinigenden Objekte vorhanden sind.

Die Anwendung von Säuren zur Reinigung wertvoller Denkmäler wird vielfach kategorisch abgelehnt.³⁵ Hinsichtlich Flußsäureanwendungen werden folgende Argumente genannt:³⁶

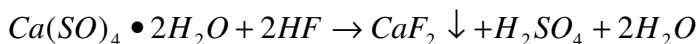
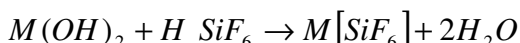
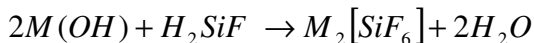
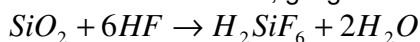
- Das umfassende Lösungsvermögen für Karbonate, Quarz und Silikate führe nicht nur zur Entfernung von Auflagerungen sondern auch zur Lösung von Bindemitteln und Gefügekomponenten des zu reinigenden Objektes.

³⁴ Will (2004) Bericht chemische Reinigungsmethoden, S. 37-41

³⁵ z.B. Snethlage u.a. (1995) Methoden der Steinkonservierung, S. 76

³⁶ Wihr (1986) Restaurierung von Steindenkmälern, S. 96 f.;

- Es bilden sich teils lösliche, giftige und schädliche Verbindungen, z.B.:³⁷



H_2SiF_6 (Hexafluorokieselsäure) bildet mit Hydroxiden oder Carbonaten zweiwertiger Metalle und Lithium lösliche, mit einwertigen Metallen und Barium unlösliche Verbindungen, die giftigen Fluorosilikate.³⁸ Calcium- und Magnesiumcarbonate werden in unlösliche Fluoride umgewandelt. Mit den Sulfaten dieser Erdalkalimetalle entstehen neben Fluoriden auch Schwefelsäure.

- Porenverstopfung durch Salze der Flusssäure
- Eine festigende Wirkung der entstehenden schwer löslichen Salze ist in Zweifel zu ziehen
- Es können Verfärbungen durch Bildung unlöslicher Eisenverbindungen entstehen.
- Starke Gesundheitsgefährdung durch Flusssäure, was aufwendige Schutzvorkehrungen erfordert.

Einige Forschungsergebnisse³⁹ deuten darauf hin, daß viele der genannten Nachteile bei sachgerechter Reinigungsdurchführung auf ein vertretbares Maß begrenzt oder ganz vermieden werden können. Besonders hervorzuheben sind eine sorgfältige Absättigung des Porenraumes mit Wasser vor Reinigungsbeginn, die Verwendung sehr niedrig konzentrierter Lösungen und das intensive Nachwaschen der gereinigten Flächen.

Aufgrund der silikatischen Bindung der zu entfernenden Auflagerungen und des dichten, nicht saugenden Oberflächen erschien eine Reinigung mit flusssäurehaltigen Mitteln für die Werkgruppe der Amphoren der Neuen Orangerie eine erwägenswerte Reinigungsalternative darzustellen.

Für die Reinigungsversuche wurden folgende Präparate und Konzentrationen ausgewählt:

- Fluorwasserstoffsäure (HF) mit einem Wirkstoffgehalt von 1 M.-%
- Wässrige Lösung von Ammoniumhydrogendifluorid $(\text{NH}_4)\text{HF}_2$, einem Salz der Flusssäure, mit einer Konzentration von 3 M.-%
- Troplexin RS, ein Flusssäure-haltiges Reinigungskonzentrat der Fa. Schmalstieg (Zusammensetzung nicht genau bekannt, enthält Ethandiol als Netzmittel, Flusssäuregehalt < 10 M.-%), in einer Verdünnung von 1 : 3 Masseteilen mit destilliertem Wasser.

Der Säureanwendung ging stets eine viertelstündige Oberflächenbehandlung mittels Wasserkompressen voraus. Nach Abschluss der Säureanwendung wurden die Reinigungsmuster sorgfältig mit Leitungswasser abgespült.

5.2.7 Laserstrahlverfahren

Die Reinigungsproben wurden von Mitarbeitern Skulpturenwerkstatt der SPSPG mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser Artlight NL 102 der Fa. BM Industries / Soliton mit folgenden Parameter ausgeführt: Wellenlänge 1064 nm, Pulslänge 6 ns, Pulsfrequenz 20 Hz, Arbeitsabstand ca. 40 cm. Variiert wurden die Energiedichten durch Veränderung von Wirkfleckdurchmesser und Pulsenergie sowie die Lichtadsorptionseigenschaft der Substratoberflächen durch deren Anfeuchtung.

5.3 Untersuchungsmethoden zur Feststellung des Reinigungsergebnisses

5.3.1 Untersuchungsmethoden in der Fachliteratur

Da Veröffentlichungen zur Reinigung von Terrakotta oder Ziegel rar sind, wurde die Literaturrecherche auf Untersuchungen zur Reinigung von Naturstein ausgedehnt. In der nachfolgenden Tabelle sind die zur Feststellung des Reinigungsergebnisses angewendeten Untersuchungsmethoden aus einigen Publikationen aufgeführt. Methoden, die ausschließlich der Charakterisierung der zu entfernenden Auflagerun-

³⁷ In Anlehnung an Reimann-Oenel (2004) Chemische Reinigung von Sandsteinfassaden, S. 44 f., S. 48; M steht für Metall

³⁸ Falbe u.a. (1995) CD Römpp Chemie Lexikon, Stichwort Fluorosilikate

³⁹ Domasłowski u.a. (1998) Untersuchung zur Konservierung von Ziegelmauerwerk, S. 18-44, S. 185 f.; Reimann-Oenel (2004) Chemische Reinigung von Sandsteinfassaden

gen, nicht jedoch auch der Charakterisierung des Reinigungsergebnisses dienen, sind in dieser Zusammenstellung nicht berücksichtigt worden:

Untersuchungsmethoden zur Feststellung des Reinigungsergebnisses in der Fachliteratur sowie deren Klassierung als zerstörungsfreie, aufwandarme, am Objekt anwendbare Methode:

	Augenschein + Fotodokumentation	Auflicht(stereo)mikroskopie	Lichtmikroskopie am Dünnschliff	REM / EDX	kapillare Wasseraufnahme	Wasserdampfdiffusionswiderstand	Trocknungsgeschwindigkeit	Luftpermeabilität	Salzgehalt	Instrumentelle Analytik (EDX, RDA, IR ...)	Farbmessung	Oberflächenrauheit	Materialabtragmessung	Verwitterungssimulation	Quecksilberdruckporosimetrie	Eindruckhärte	Ausblühneigung
Labormessung	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
zerstörungsfreie, aufwandarme Untersuchung vor Ort	X	(X)			X			X			X	(X)					
Borrmann u.a. (1994) ⁴⁰			X	X						X				X			
Hoffmann u.a. (1994) ⁴¹	X	X											X				
Vergès-Belmin (1996) ⁴²	X	X	X	X							X	X					
Snethlage (1997) ⁴³	X	X		X	X	X			X		X	X					
Snethlage u.a. (1998) ⁴⁴	X				X						X	X					
Ettl u.a. (1998) ⁴⁵				X	X	X											
Conahan (1999) ⁴⁶				X	X	X						X		X			
Domaslowski u.a. (1998) ⁴⁷	X								X								X
Grassegger (2004) ⁴⁸	X	X	X	X	X	X					X	X					
Reimann-Oenel (2004) ⁴⁹	X		X		X	X	X		X					X	X	X	X
Rousset u.a. (2004) ⁵⁰												X					

Während einige Untersuchungen sich auf die grundsätzliche Charakterisierung einzelner Reinigungsmethoden in Leistungsvermögen und Gefahrenpotential konzentrieren (z.B. Hoffmann, Conahan, Grassegger, Reimann-Oenel) steht bei den übrigen Publikationen die Auswahl der am besten geeigneten Methode für ein bestimmtes Objekt oder eine Materialgruppe aus einer Vielzahl von Reinigungsmethoden im Zentrum. Die Wahl der Untersuchungsmethoden hängt selbstverständlich auch von der Art der untersuchten Reinigungsverfahren und den zeitlichen und finanziellen Rahmenbedingungen der jeweiligen Studie ab.

Wie die grau unterlegten Zeilen ausweisen, sind nur wenige Methoden zerstörungsfrei und mit relativ geringem Aufwand am Objekt anwendbar. Die Messung der Luftpermeabilität als weiteres zerstörungsfreies Messverfahren finden keine Erwähnung.

Für die meisten Autoren ist die Inaugenscheinnahme und fotografische Dokumentation der Reinigungsmuster zur Feststellung der optischen Reinigungswirkung unverzichtbar. Dabei gilt es v. a., Intensität und Gleichmäßigkeit der Reinigung in ihrer ästhetischen Dimension zu erfassen und erforderlichenfalls die subjektiv gefärbten Beobachtungen durch Farbmessungen zu objektivieren. Inwieweit durch eine Reini-

⁴⁰ Borrmann u.a. (1994) Mikroskopische Beurteilung trocken gereinigter Bauwerksteine

⁴¹ Hoffmann u.a. (1994) Beurteilungskriterien für die Reinigung mit einem Trockenstrahlverfahren

⁴² Vergès-Belmin (1996) Laser für die Reinigung von Notre-Dame in Paris?

⁴³ Snethlage (1997) Leitfaden Steinkonservierung

⁴⁴ Snethlage u.a. (1998) Untersuchungsprogramm an der Kirche St. Moritz in Coburg

⁴⁵ Ettl (1998) Schwarze Krusten: Die Reinigung von Natursteinoberflächen

⁴⁶ Conahan (1999) An Assessment of the Effects of Hydrofluoric Acid Based Cleaners on Terra Cotta

⁴⁷ Domaslowski u.a. (1998) Untersuchung zur Konservierung von Ziegelmauerwerk, S. 18-44

⁴⁸ Grassegger (2004) Begleituntersuchungen zu restauratorischen Feinstrahlreinigungen

⁴⁹ Reimann-Oenel (2004) Chemische Reinigung von Sandsteinfassaden

⁵⁰ Rousset u.a. (2004) Roughness Measurement applied to Building Cleaning

gung auch die erwünschten Verbesserungen der physikalischen Oberflächeneigenschaften erzielt werden kann, lässt sich nur anhand von Messungen feststellen (Salzgehalt, kapillare Eigenschaften, Wasserdampfdiffusion, Trocknungsgeschwindigkeit). Reinigungsbedingte Beschädigungen der originalen Objektoberflächen sind mit bloßem Auge in der Regel nicht zuverlässig zu erkennen. Hierzu bedarf es lichtmikroskopischer Untersuchungen an Oberflächen im Auflicht oder von Querschliffen im Durchlicht oder elektronenmikroskopischer Untersuchungen.

Während die meisten Autoren fast ausschließlich verschmutzte Objektoberflächen zu Reinigungsversuchen heranziehen, wohl auch deshalb, um der Abhängigkeit des Reinigungsergebnisses von Materialität und Zustand der verschmutzten Oberflächen Rechnung zu tragen, führen andere Wissenschaftler zusätzlich oder sogar ausschließlich Versuche auf standardisierten, unverschmutzten Untergründen durch (Grassegger: Glasplatten; Conahan: fabrikneue Terrakotta; Domaslowski und Reimann-Oenel: geschnittene Ziegel- bzw. Sandsteinprismen). Hierdurch sollen reinigungsbedingte Veränderungen besonders deutlich gemacht werden, weil die Beschaffenheit vor der Reinigung ohne jede Einschränkungen dokumentiert werden kann.

Mehrere Autoren versuchen zusätzlich die langfristige Auswirkungen von Reinigungsmaßnahmen anhand von Verwitterungssimulationsversuchen abzuschätzen (Frost-Tau-Wechsel, Salzkristallisation, Temperaturwechsel und Nass-Trocken-Zyklen) oder empfehlen die Beobachtung von Musterflächen am Bauwerk unter natürlichen Klimabedingungen über längere Zeiträume (Snethlage).

Besonders große Methodenvielfalt herrscht bei der qualitativen oder quantitativen Erfassung der Oberflächenrauheit, wobei z.T. die Frage problematisiert wird, inwiefern Ergebnisse von Rauigkeitsmessungen interpretierbar sind und zur Beurteilung von Reinigungsverfahren beitragen können. Snethlage gibt zu bedenken, dass die Rauigkeit schonend gereinigter Oberflächen gegenüber ungereinigten ansteigen müsse, da Anlagerungen und Krusten Vertiefungen der ursprüngliche Oberfläche überdecken. Die Schwierigkeit liege darin, originale Oberflächen ohne verwitterungsbedingte Veränderung als Vergleichsmaßstab ausfindig zu machen. Nach Vergès-Belmin sind jedoch auch reinigungsbedingte Oberflächenglättungseffekte zu beobachten, deren Bewertung unter Mitberücksichtigung der möglicherweise verminderten Neigung zur Wiederverschmutzung Ermessensspielräume biete.

Eine Einschätzung und Bewertung der Ergebnisse setzt bei allen Methoden den Vergleich der mit verschiedenen Verfahren bzw. Verfahrensparametern gereinigter Flächen untereinander und mit ungereinigten Flächen voraus, soweit möglich auch unter Einbeziehung unverschmutzter, nicht gereinigter Flächen. Über die Formulierung dieses allgemeinen Prinzips hinaus fehlt jedoch in allen aufgeführten Publikationen eine ausführlichere Darstellung und Diskussion der Bewertungsmaßstäbe. Während sich bei den physikalischen Kennwerten als messbaren Merkmalen eine Bewertung allenfalls noch implizit aus den Kennwerten des unverschmutzten Materials als Referenz ableiten lässt, sind Bewertungen bezüglich qualitativer, nicht messbarer Merkmale wie ästhetischer Reinigungswirkung oder morphologische Veränderungen der Oberflächen im mikroskopischen Maßstab ohne eine Kategorisierung der Merkmalsausprägungen und Definition eines Bewertungsschlüssels nicht mehr nachprüfbar. Dies gilt um so mehr bei der abschließenden Beurteilung der Eignung verschiedener Reinigungsverfahren und –parameter, falls sich Zielkonflikte zwischen unterschiedlichen Anforderungen an eine Reinigung ergeben, die mit den Schlagworten Substanzerhalt, Schadstoffentfernung, Wiederherstellung der ursprünglichen Gesteinseigenschaften und Wiederherstellung des ursprünglichen Aussehens zu umreißen sind. Im folgenden werden die im Rahmen des Projektes angewendeten Untersuchungsmethoden vorgestellt.

5.3.2 Feststellung der visuellen Reinigungsergebnisses

Die ästhetische Wirkung der gereinigten Musterflächen wurde vergleichend mit bloßem Auge festgestellt. Die Bewertung erfolgte in direkter und vergleichender Betrachtung der Musterflächen, nicht anhand der Fotos. Die Fotografie aller Musterflächen vor und nach der Reinigung unter standardisierten Bedingungen diente ausschließlich der Dokumentation der Reinigungswirkung und ihrer Veranschaulichung in den Untersuchungsberichten.⁵¹

Zur Eingrenzung der Subjektivität bei der Bewertung der Musterflächen wurde zwischen den Kategorien (A) Reinigungsintensität/Reinigungsgrad⁵² und

⁵¹ Digitalkamera Fuji Finepix S 2 pro mit AF Micro Nikkor 60 mm im Repröstander, gleichmäßige, reproduzierbare Ausleuchtung mit 4 Tageslichtleuchtstoffröhren; gleichbleibende manuelle Belichtung nach Graukarte

⁵² Der von Bernitz u.a. (2004) und Bernitz (2006) verwendete Begriff „Reinigungswirkung“ wird in diesem Zusammenhang bewußt vermieden, da der Begriff mehrdeutig ist. Er läßt sich sowohl auf die erzielte Intensität einer Reinigung als auch auf die visuelle

(B) Gleichmäßigkeit unterschieden. Zusätzlich wurden

(C) Verletzungen der Oberfläche, die sich als kleine helle Punkte abzeichneten, registriert, soweit sie mit bloßem Auge zu erkennen waren. Dieses auch als „Löcher“ bezeichnete Merkmal bildet insofern den Übergang zur mikroskopischen Feststellung von Schadensindikatoren, also zur eindeutigen Differenzierung mechanischer Beschädigungen der Oberfläche von herstellungsbedingten hellen kleinen Flecken die beobachteten Punkte einer mikroskopischen Kontrolle unterzogen wurden. Die ästhetische Gesamtwirkung gereinigter und ungereinigter Flächen wird von den konkreten Merkmalsausprägungen in allen drei Kategorien bestimmt. Um zumindest nachprüfbar, wenn nicht reproduzierbare Bewertungen zu erzielen, wurden für jede Kategorie möglichst präzise Bewertungsmaßstäbe formuliert.

Vergleichende Farbmessungen als weitere Möglichkeit einer objektivierenden Feststellung der Reinigungswirkung wurden nicht durchgeführt. Ausschlaggebend hierfür war die skeptische Einschätzung des hiermit verbundenen Aufwandes, die wechselnde Farbigeit und Helligkeit der keramischen Oberflächen des Prüfkörperkollektivs der cremefarbenen Gitterelemente und der Sachverhalt, dass für eine Reihe von Reinigungsmustern Vergleichsmessungen im ungereinigten Vorzustand nicht mehr durchgeführt werden konnten.

5.3.3 Messung oberflächennaher physikalischer Eigenschaften

In der 1. Untersuchungsphase (2002/2003) wurden an allen Reinigungsmustern vor und nach der Reinigung die kapillare Wasseraufnahme mittels Wassertropfeneindringtest und die Luftpermeabilität ermittelt.⁵³ Durch Verwendung von Lochmasken wurde dabei sichergestellt, dass die Messungen vor und nach der Reinigung an identischen Bereichen vorgenommen wurden (Abb. 76). Da die Messergebnisse im Vor- und Nachzustand identisch waren, wurden diese Messungen in den späteren Untersuchungsphasen nicht mehr durchgeführt.

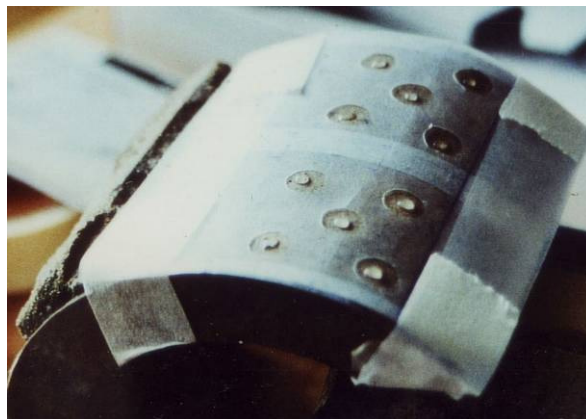


Abb. 76: Wassertropfeneindringtest an Reinigungsmustern unter Verwendung einer Lochmaske

Die Rauigkeit ungereinigter und gereinigter Oberflächen wurde von mehreren Personen mit dem Tastsinn erfasst. Dabei diente Schleifpapier bekannter Körnung als Referenz. Es konnten keine für die Beurteilung relevanten Ergebnisse erzielt werden, da sich die Scherbenrauigkeit der verschiedenen Gitterelemente als stark unterschiedlich erwies und reinigungsbedingte Effekte nicht festgestellt werden konnten. Daher wurde im weiteren Projektverlauf keine Rauigkeitsmessungen mehr durchgeführt.

5.3.4 Stereomikroskopische Untersuchung von Schadensindikatoren

Zur Erfassung unerwünschter Veränderungen bzw. Beschädigungen der Keramikoberflächen infolge von Partikelstrahlreinigungen wurden die Musterflächen mikroskopisch untersucht. Hierfür stand ein Stereozoommikroskop mit Fototubus (Trinokular), Modell Askania GSZ 2T der Fa. Mikroskop Technik Rathenow GmbH zur Verfügung. Es ermöglicht beliebige Vergrößerung zwischen den Grenzfaktoren 10 und 100.⁵⁴ Das Relief der Oberfläche wurde dabei durch Streiflicht von links hervorgehoben und einzelne Befunde mit einer Digitalkamera exemplarisch fotografiert.⁵⁵

Von der ersten studentischen Arbeitsgruppe wurden Schäden an den mittels Mikrotrockenstrahlverfahren gereinigten Musterflächen im Vergleich zu ungereinigten Flächen in summarischer Weise qualitativ beschrieben und dabei neben Schäden auch weitere Oberflächeneigenschaften wie Glanz und Verteilungsmuster von Auflagerungsresten notiert.⁵⁶

Gesamtwirkung der gereinigten Fläche beziehen, die jedoch zumindest von den beiden anderen Kategorien Gleichmäßigkeit und Oberflächenverletzungen mitbestimmt wird.

⁵³ Sanger (2003) Projektdokumentation, S. 53 u. 66

⁵⁴ Leistungsmerkmale: Okulare 10 x, Zoomobjektiv 1-5 x, Vorsatzlinse 2 x

⁵⁵ Kohlrusch 150 Watt Quecksilberdampflampe, Farbtemperatur 5200 K, Objektentfernung ca. 25 cm; Digitalkamera Fuji FinePix S 2 Pro (ohne Objektiv direkt auf dem Kameraadapter des Mikroskops, dem Projektiv mit einem Faktor von 3,2 befestigt)

⁵⁶ Sanger (2003) Projektdokumentation, S. 62-65

Das eindeutige Feststellen reinigungsbedingter Beschädigungen an keramischen Oberflächen und deren qualitative und (halb)quantitative Bewertung erfordert die Identifikation und Definition mehr oder weniger markanter Merkmale, da sich ein gleichmäßiger Substanzverlust durch Feinstabtrag an der Oberfläche mit den relativ geringen Vergrößerungen der Stereoauflichtmikroskopie nicht oder nicht sicher genug erkennen lässt. Die zweite studentische Arbeitsgruppe systematisierte daher die Fülle der mikroskopisch zu beobachtenden morphologischen und farblichen Oberflächenphänomene auf den Prüfkörpern und leitete daraus ein nachfolgend beschriebenes dreiteiliges System schadenssensitiver, punktförmiger Merkmale ab, bestehend aus den Kategorien (D) Kraterränder, (E) Quarzkorn-umgebungen und (F) aufstehende Körner.⁵⁷ Weitere, eher flächige Oberflächenphänomene im Mikromaßstab wie Glanz, Rauigkeit oder Verteilungsmuster von Auflagerungsresten wurden nicht systematisiert und erfasst.

- (D) Kraterränder

Auf den Terrakottaoberfläche sind eine Reihe verschiedener Öffnungen zu beobachten: Größere Öffnungen mit mehr oder weniger überhängenden Rändern werden als Krater bezeichnet. Die Kraterränder sind teils sehr dünn und daher mechanisch empfindlich, teils dicker ausgeprägt. Sie weisen häufig einen feinen Randwulst auf. Die Palette der Erscheinungsformen reicht von Kratern mit weit auskragenden Rändern bis hin zu Kratern mit senkrecht abfallenden Wandungen. Vergleichsweise flachen Vertiefungen, deren Wandungen flachwinklig an die Öffnungsränder anschließen und die naturgemäß mechanisch meist robuster sind, werden dagegen als Kuhlen bezeichnet. Als weiterer Typ von Vertiefungen treten gelegentlich grabenartige Ausbildungen auf, die ebenfalls sensible Kanten aufweisen können. Die Abbildungen 77 - 79 zeigen einige Beispiele unterschiedlicher Erscheinungsformen von Kraterrändern auf ungereinigten Oberflächen des Typs Albanische Gitterelemente: Weisen die Kraterränder nach einer Reinigung mit Partikelstrahlverfahren scharfe Bruchkanten oder aber eine Zurundung infolge eines schleifenden Materialabtrags auf, so wird dies ebenso als mechanische Beschädigung interpretiert wie eine auffallend weiße Färbung der Kraterränder und / oder des Kraterinneren.

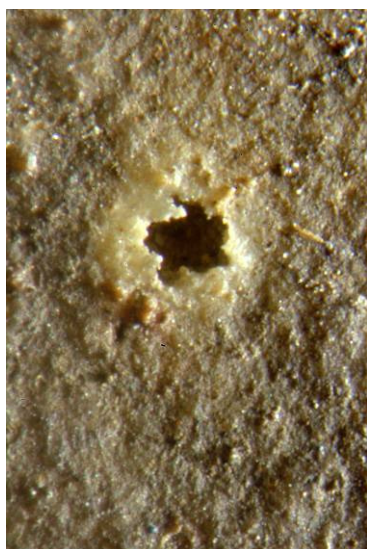


Abb. 77: großer Krater mit weit überhängenden, sehr fragilen Rändern (Bernitz u.a. 2004, Abb. 15)

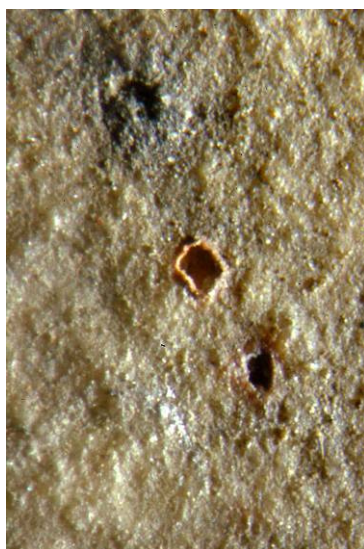


Abb. 78: zwei mittelgroße Krater, einer davon mit Randwulst (Bernitz u.a. 2004, Abb. 16)

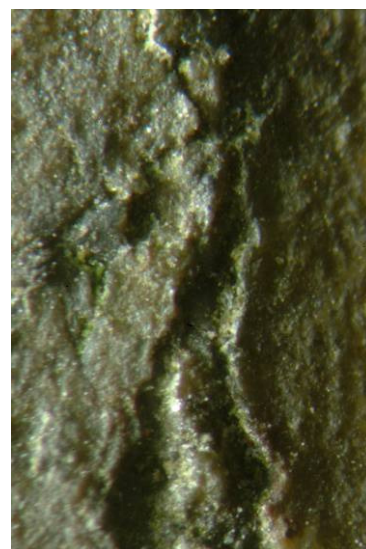


Abb. 79: grabenartige Öffnung mit mechanisch sensiblen Rändern (Bernitz 2006, Foto 0955_E7.2).

- (E) Quarzkörner und deren Umgebungen

Die keramischen Scherben von Modellobjekt 1 (Amphore) und den Elementen des Albanischen Gitters enthalten Quarzkörner als Magerungsstoffe. Einzelne dieser Körner ragen mit einer Seite in unterschiedlichem Ausmaß aus der überwiegend von einer feinkörnigen Grundmasse gebildeten Scherbenoberfläche heraus. Die unmittelbare Umgebung solcher Quarzkörner kann ggf. mechanische Verletzungen infolge von Partikelstrahlreinigung aufweisen, die an einer weißen Farbigeit und mitunter auch an einer grabenartigen Vertiefung rund um das betreffende Quarzkorn zu erkennen sind. Auch die Kornoberfläche selbst kann Beschädigungen in Form von Absplitterungen aufweisen. Beispiele für Quarzkornumgebungen im ungereinigten, gereinigten aber unverletzten und im gereinigten Zustand

⁵⁷ Bernitz u.a. (2004) Projektdokumentation, S. 24-30; Bernitz (2006) Untersuchungsbericht, S. 16, 19-21

mit eingetretener Beschädigung zeigen die folgenden Abbildungen 80 - 82.

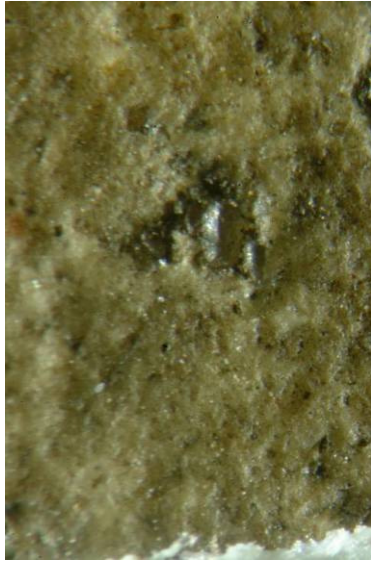


Abb. 80: Quarzkornumgebung
(ungereinigt, intakt)

Bernitz (2006), S. 38, Abb. 49



Abb. 81: Quarzkornumgebung
(gereinigt, intakt)

Bernitz (2006), S. 38, Abb. 50

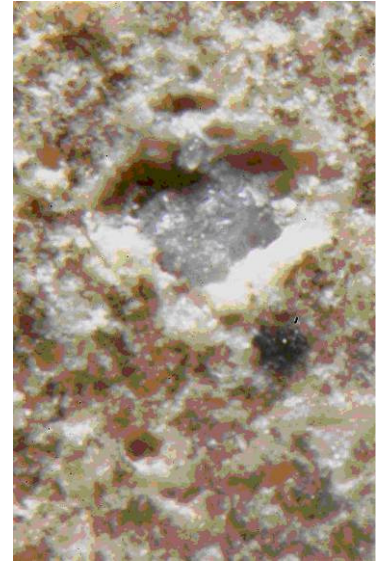


Abb. 82: Quarzkornumgebung
(gereinigt, beschädigt)

Bernitz u.a. (2004), S. 29, Abb. 33

- (F) aufstehende Körner

Während die Quarzkörner bei Merkmal (E) tief in der Scherbenmatrix eingebettet und dort fest verankert sind, sitzen einzelne Körner mehr oder weniger frei auf der Scherbenoberfläche auf und haben nur an ihrer Unterseite eine kleinflächige Anbindung an den Scherben. Diese aufstehenden Körner sind bei mechanischer Beanspruchung durch Partikelstrahlverfahren verlustgefährdet. Beispiele für Erscheinungsformen dieser 3. Kategorie von Mikroschadensindikatoren geben die Abbildungen 83 - 85.

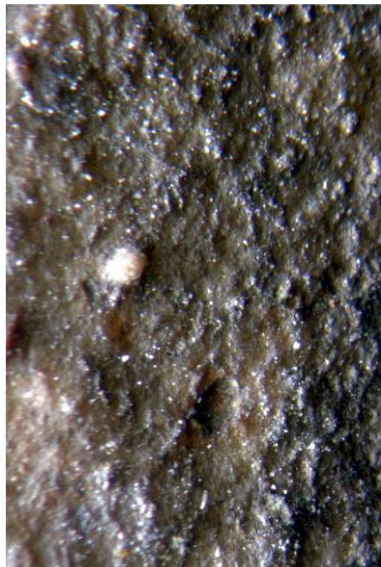


Abb. 83:

Bernitz (2006), S. 41, Abb. 57,
AG 68 b II, Raster A4



Abb. 84:

Bernitz (2006), S. 41, Abb. 58, AF
1_08, Raster C8

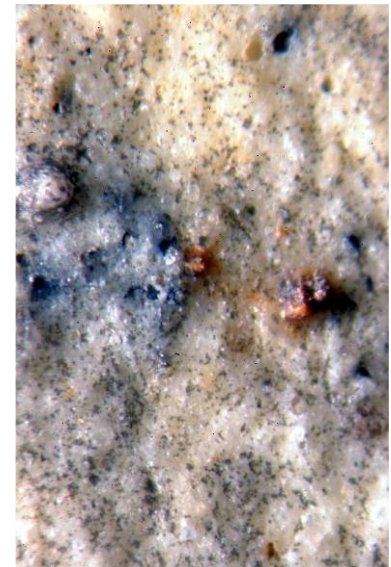


Abb. 85:

Bernitz (2006), S. 44, Abb. 65, AG 42 a
I, Raster D6

Bei allen drei Schadenskategorien (D) bis (F) ergaben sich Unsicherheiten in der eindeutigen Feststellung reinigungsbedingter Veränderungen, aus folgenden Gründen:

- Die Gitterelemente wiesen recht große, herstellungsbedingte Unterschiede in der Oberflächenausbildung auf, sowohl im Vergleich der Musterflächen untereinander als auch in geringerem Maße innerhalb einzelner Musterflächen. So bot etwa die vergleichende Betrachtung der gereinigten Flächen mit

den angrenzenden ungereinigten, während der Reinigung abgedeckten Randstreifen keine zuverlässigen Informationen, ob im Vorzustand viele oder wenige aufstehende Körner vorhanden waren.

- Die Kriterien, die zur Feststellung reinigungsbedingter Schäden definiert worden waren, wie scharfe Abbruchkanten an Kraterändern oder aber deren Zurundung infolge schleifenden Materialabtrages, weiße Scherbenfärbungen an Kraterändern und Umgebungen von Quarzkörnern als Indiz für Scherbenverluste, erwiesen sich als nicht eindeutig genug. Zum einen ließen sich manche Strahlmittel auch mit Druckluft nicht restlos aus Vertiefungen entfernen, so daß eine Verwechslung mit dem Kriterium abrasionsbedingte Weißfärbung gegeben war. Zum anderen war aufgrund der Formenvielfalt der Krateränder eine sichere Unterscheidung zwischen reinigungsbedingter Veränderung und ursprünglicher Gestalt allenfalls bei grober Beschädigung möglich.

Der mikroskopischen Inspektion der gereinigten Flächen muß daher zur eindeutigen Identifikation reinigungsbedingter Schäden eine mikroskopische Untersuchung der ungereinigten Flächen vorausgehen. Dabei müssen die genannten Schadensindikatoren systematisch erfaßt werden, entweder fotografisch in einem repräsentativen Umfang oder vollständig, wenn es sich um zählbare, verlustgefährdete Einheiten handelt (aufstehende Körner).

5.3.5 Mikroskopischer Zustandsvergleich vor und nach der Reinigung

Wichtigste Voraussetzung für einen systematischen Zustandsvergleich vor und nach einer Reinigung im mikroskopischen Maßstab ist das wieder Auffinden der beobachteten Merkmale nach der Reinigung. Hierfür haben sich folgende Arbeitstechniken bewährt:

Über die durch Abklebung mit Kreppklebeband definierte Fläche des Reinigungsmusters wird eine transparente Folie mit aufgedrucktem Raster gelegt, wobei die linke obere Ecke und die obere oder die linke Kante von Folienrasterung und Abklebung in Deckung gebracht werden. Die obere Seite der Folie wird dann mit Klebeband fixiert, so dass die Rasterfolie nun beliebig ins mikroskopische Bildfeld ein- oder ausgeklappt werden kann. Jedes Rasterfeld lässt sich durch die Kennzeichnung der Zeilen und Spalten alphanumerisch eindeutig bezeichnen und damit auch das in einem bestimmten Planquadrat

aufgefundene Merkmal. Der verwendete Rasterabstand betrug 4 mm.⁵⁸



Abb. 86: Rasterfolie mit Kartierungsmarkierungen auf einem Element des Albanischen Gitters

Weitere Möglichkeiten ergeben sich durch die Kartierung der interessierenden Phänomene auf der Folie mittels Folienschreiber. Dabei kann für jedes Merkmal eine eigene Farbe verwendet werden. Eine Größenbeschränkung der Musterfläche besteht nach Auffassung von D'ham bei dieser Methode prinzipiell nicht, wenn gleich die Handhabung mit zunehmenden Größe schwieriger werden dürfte. Allerdings können Raster- bzw. Kartierungsfolien nur auf planen oder einseitig gekrümmten Flächen verwendet werden. Auf komplex gekrümmten, insbesondere plastisch geformten Flächen führt folgende Methode zum Ziel:⁵⁹ Der interessierende Bereich wird zunächst in einer Übersichtsaufnahme, dann in einer oder auch mehreren Nahaufnahmen bei wachsenden Abbildungsmaßstäben fotografiert. Die wieder zu findenden Phänomene bzw. nachzustellenden Mikroaufnahme werden dann jeweils auf diesen Nahaufnahmen kartiert. Unbedingt zu empfehlen ist die Integration eines Maßstabes in die Nahaufnahmen und nach Möglichkeit die Auswahl von markanten Bildausschnitten. Sehr hilfreich ist das Aufkleben kleiner Markierungen auf das Objekt.

Das verwendete Equipment zur fotografischen Dokumentation mikroskopischer Befunde wurde bereits zu Beginn des vorigen Kapitels vorgestellt. Die Aufnahmeparameter wurden in verschiedenen Phasen des Forschungsprojektes allerdings etwas unterschiedlich gehandhabt. In der 2. und 3. Untersuchungsphase 2003/2004 und 2004/2005 weisen die mikroskopischen Bildausschnitte wechselnde Größen zwischen 26 * 39 mm und 16,5 * 24 mm auf. Dabei ergab sich nach Auffassung der Autorinnen die zwingende Notwendigkeit einer digitalen Nachbearbeitung einzelner Aufnahmen mittels einer Bildbearbeitungssoftware.

⁵⁸ Ein noch geringerer Rasterabstand könnte das Wiederauffinden von Merkmalsausprägungen vermutlich beschleunigen.

⁵⁹ Bernitz (2006) Untersuchungsbericht, S. 11 f.

Die Reinigungsversuche im Jahre 2006 wurden dagegen mit immer gleichen Kamera- und Mikroskopeinstellungen dokumentiert, um aus Gründen der Arbeitsökonomie auf jegliche digitale Nachbearbeitung der Aufnahmen vollständig verzichten zu können und damit auch eine möglichst objektive Dokumentation zu erhalten. Die Beleuchtung fiel als hartes Streiflicht im konstanten Winkel und konstantem Abstand von Leuchte zu Objekt von oben links ins Bild, wobei eine Aufhellung der Schatten mittels Reflexionsschirm nicht vorgenommen wurde.

Die Objektausschnitt des mikroskopischen Bildes beträgt stets $2,6 * 3,9$ mm.⁶⁰ Das Nachstellen möglichst identischer Bildausschnitte bei den Nachzustandsfotos bedarf einiger Übung und ließe sich bei besserer Abstimmung von Mikroskop, Digitalkamera und Computer noch deutlich verbessern und beschleunigen. Die mit der gegebenen Ausrüstung erzielbare Bildqualität ist begrenzt, erfüllt jedoch den vorgesehenen Zweck.

Die Anzahl der Mikrofotopaare je Reinigungsmuster ist in den verschiedenen Untersuchungsphasen unterschiedlich. Während 2003/2004 die fotografische Dokumentation von Vor- und Nachzustand nur exemplarisch erfolgte und etwa 8 Aufnahmepaare je Musterfläche angefertigt wurden, wurden 2004/2005 meist 10-15 Ausschnitte je Musterfläche dokumentiert. In der letzten Untersuchungsphase 2006 wurden etwa 20 bis 25 Bilder je Fläche und Zustand aufgenommen.

Die Auswertung der Bildpaare wurde in allen Untersuchungsphasen am Bildschirm vorgenommen, wobei als Bildbetrachtungssoftware zunächst Adobe Photoshop diente. In der letzten Projektphase 2006 wurde hierfür das Programm ThumbsPlus 7x⁶¹ verwendet, das eine sehr rasche Synchronbetrachtung der Vor- und Nachzustandsaufnahmen inklusiver beliebiger Ausschnitte hiervon ermöglicht.

Prinzipiell ist ein rein quantitativer Vergleich verlustgefährdeter Merkmalsträger vor und nach einer Reinigung auch ohne Mikrofotografie möglich. Dies erfordert jedoch eine sehr präzise Definition des Schadensindikators (F) aufstehende Körner, um Ermessensspielräume bei der quantitativen Erfassung vor und nach der Reinigung auszuschließen. Ferner müssen ausnahmslos alle betreffenden Merkmalsträger einer Musterflächen erfasst werden, was ein flächendeckende mikroskopische Untersuchung der Musterflächen erfordert. Während dieses Vorgehen in der Untersuchungsphase 2003/2004 gewählt wurde, ist nach den Erfahrungen des Autors eine Dokumentation anhand exemplarischer Mikrofotos weniger zeitaufwendig und zuverlässiger.

5.3.6 Diskussion der Untersuchungsmethoden

Die Konzentration auf die Stereomikroskopie bzw. Mikrofotografie als Methoden zur Erfassung reinigungsbedingter Oberflächenschäden leitet sich aus der Schwerpunktsetzung der Studie bei den Partikelstrahlverfahren ab. Die Methode erschien v. a. geeignet, mechanisch verursachte Veränderungen der Oberflächen zu erkennen, wenn diese eine Mindestgröße von ca. 0,02 mm nicht unterschreiten.⁶² Beschädigungen kleinerer Größenordnung wie sie z.B. von Ettl u.a. mittels REM als Veränderungen der Kornoberflächen dokumentiert wurden, konnten hiermit nicht erfasst werden. Doch auch Auswirkungen auf weitere Parameter wie z.B. den Gehalt an löslichen Salzen, wie er insbesondere auch bei Anwendung chemischer Reinigungsverfahren interessiert, konnten im begrenzten Rahmen des Projektes nicht untersucht werden. Die erzielbaren Erkenntnisse und Bewertungen der untersuchten Reinigungsverfahren unterliegen demnach Begrenzungen.

Zu erwähnen ist noch, dass bei Feststellung reinigungsbedingter Veränderungen anhand von Mikrofotos die räumliche Dimension, wie sie bei direkter stereomikroskopischer Betrachtung gegeben ist, verloren geht. Hierdurch wird die Bildinterpretation erschwert, zumal Abbildungsfehler der Mikroskopoptik, die bei stereoskopischer Betrachtung vom Gehirn kompensiert werden, deutlicher hervortreten.

⁶⁰ Bei einer Zoomeinstellung Faktor 2 und Verzicht auf die Vorsatzlinse Faktor 2 schien der bestmögliche Kompromiss zwischen Auflösung, Tiefenschärfe und Qualitätseinbußen durch Abbildungsfehler gegeben.

⁶¹ kostenlosen Shareware der Firma Cerious Software Inc., deutsche Fassung von AtlantisSX Inc.


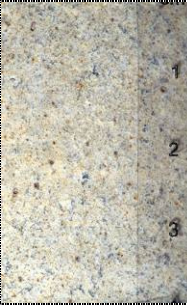

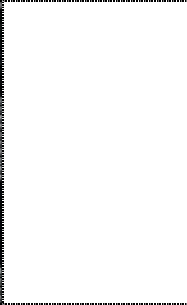




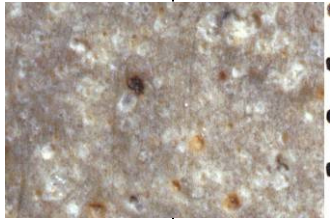
⁶² Da die Bildbreite für eine Objektstrecke von 3,9 mm steht, entspricht 1 Millimeter auf dem Bildschirm bei einer Bildschirmbreite von 300 mm rechnerisch 0,013 mm am Objekt. Aufgrund der begrenzten Bildqualität erscheint eine Rundung auf 0,02 mm als maximale Auflösung angebracht.

5.4 Bewertungsmaßstäbe in den einzelnen Untersuchungskategorien

5.4.1 Reinigungsergebnis (Reinigungsgrad, Gleichmäßigkeit, Verletzungen)

Um die Beurteilung des Reinigungsergebnisses nachprüfbar und mit dem geringst möglichen Grad an Subjektivität durchführen zu können, wurden für die Beurteilungskriterien (A) Reinigungsgrad, (B) Gleichmäßigkeit und (C) mit bloßem Auge erkennbare Verletzungen Bewertungsskalen mit 3 bis 4 Bewertungsstufen (+ / gut), (O / ausreichend), (- / schlecht) und ggf. (-- / sehr schlecht) sowie Bewertungsmaßstäbe definiert, die eine eindeutige Zuordnung der einzelnen Reinigungsmuster zu den Bewertungsstufen bewirken sollten. Die Definition der Maßstäbe wurden aus Leitfragen abgeleitet. Das von Bernitz und Jacobsen erarbeitete Bewertungsschema zeigt die folgende Tabelle:

Bewertungsmaßstäbe und Bildbeispiele für die mit bloßem Auge zu bewertenden Kriterien⁶³:

Beurteilungskriterien	Bewertungsmaßstäbe und Bildbeispiele			
	+ (gut)	O (ausreichend)	- (schlecht)	-- (sehr schlecht)
(A) Reinigungswirkung <ul style="list-style-type: none"> Vermittelt die Fläche den Eindruck, gereinigt worden zu sein und in welchem Maße? Beurteilt wird der Reinigungsgrad. Welche Menge an Schmutzpartikeln ist noch auf der Oberfläche, und vermittelt sie den Eindruck einer patinierten Fläche? 	nicht, kaum sichtbar patiniert	leicht sichtbar patiniert	verschmutzt	kein Reinigungserfolg
				
(B) Gleichmäßigkeit <ul style="list-style-type: none"> Erscheint die Oberfläche gleichmäßig gereinigt und in welchem Maße? Beurteilt wird, wie verbliebene Schmutzpartikel auf der Fläche verteilt sind, feinstverteilt oder deckend zusammengeballt. Stehen gereinigte helle neben patinierten bzw. stark verschmutzten dunklen Bereichen und wie augenfällig sind diese ODER wie stark tritt der Kontrast zwischen hellen und dunklen Bereichen zum Vorschein? 	gleichmäßig	relativ gleichmäßig	ungleichmäßig	stark ungleichmäßig
				
(C) Verletzungen („Löcher“) <ul style="list-style-type: none"> Löcher sind rundliche, sich hell absetzende Stellen, die mit bloßem Auge zu sehen sind. Es wird davon ausgegangen, dass es sich um Verletzungen von Kraterändern oder Kraterinnenräumen handelt. Dies ist exemplarisch unter dem Mikroskop zu überprüfen. 	keine		zählbar (<10)	nicht zählbar (>10)
				

Im Zuge der Bewertung der 2006 neu erstellten Reinigungsmuster versuchte der Autor zunächst, die bereits vorgenommenen Bewertungen aus den vorausgegangenen Untersuchungsphasen nachzuvollziehen, um die eigenen Beurteilungen hierauf abzustimmen. Dabei kam der Autor häufiger zu abweichenden

⁶³ Leicht überarbeitete Tabelle aus Bernitz (2006) Untersuchungsbericht, S. 14

Beurteilungen, worauf hin er sich entschloss, zusätzlich zu den neuen Reinigungsmustern und zugunsten einer möglichst uneingeschränkten Vergleichbarkeit auch die früheren Musterflächen an den Albanischen Gitterelementen und die Reinigungsfelder des Amphorenfußes einer erneuten Bewertung zu unterziehen. Offenbar lassen die vorgestellten Bewertungsmaßstäbe noch Ermessensspielräume zu. Hierzu mag auch die Auswahl der Bilder beitragen, die nach Einschätzung von D'ham auch aufgrund einer ungleichmäßigen Beleuchtung (Streiflicht) und der Verschattung des rechten Bildrandes durch den aufgelegten Maßstab nur eine begrenzte Aussagekraft haben.

In der Ergebnispräsentation werden die Bewertungsunterschiede kenntlich gemacht.

5.4.2 Schädigungsgrad

Ohne Zweifel schafft erst der Vergleich ausschnittsidentischer Mikrofotografien vor und nach einer Reinigung verlässliche methodische Voraussetzungen, um reinigungsbedingte Veränderungen im mikroskopischen Maßstab sicher erkennen zu können. Diese Aussage sei durch ein Bildbeispiel illustriert.



Abb. 87: Reinigungsmuster AG 42 b I, vor der Reinigung



Abb. 88: Reinigungsmuster AG 42 b I, nach der Reinigung: Veränderung von Kraterrändern, Entstehung neuer „Löcher“, Einebnung des feinen Oberflächenreliefs

Die Beurteilungsmaßstäbe für die mikroskopischen Schadensindikatoren (D) Kraterränder, (E) Quarzkörner und deren Umgebung sowie (F) aufstehende Körner haben sich während der Projektlaufzeit mehrfach gewandelt. Nachfolgend werden die drei unterschiedlichen Bewertungsschemata der Untersuchungsphasen Bernitz / Jacobsen (2003/2004), Bernitz (2004/2005) und D'ham (2006) vorgestellt. Die Frage der Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse bei unterschiedlicher Bewertungsmethode wird nachfolgend diskutiert.

Während der 1. Untersuchungsphase 2002/2003 erfolgte nur eine summarische Beurteilung der auflichtmikroskopisch wahrnehmbaren Schäden. Ein differenziertes Bewertungssystem war zu diesem Zeitpunkt noch nicht erarbeitet worden.

In der 2. Untersuchungsphase 2003/2004 wurden die Bewertungskategorien für Schäden im mikroskopischen Maßstab noch ohne Vergleichsmöglichkeit mit ausschnittsidentischen Mikrofotos des Vorzustandes gebildet. Dabei wurden je Merkmal 3 bis 4 Bewertungsstufen und entsprechende Bewertungsmaßstäbe definiert. Wie sich herausstellte, konnten mit dieser Methode nur sehr grobe Beschädigungen an den Terrakottaoberflächen sicher erkannt werden. Die beiden Autorinnen entwickelten daraufhin das Verfahren des fotografisch unterstützten systematischen Zustandsvergleichs vor und nach der Reinigung. Das zuvor erarbeitete Bewertungssystem wurde dabei ohne Änderung übernommen, und wird auf der folgenden Seite tabellarisch dargestellt.

Eine zusätzliche Differenzierung erfährt das Bewertungsschema durch Angabe von Tendenzen (+) oder (-) in der Beurteilungskategorie O (ausreichend) bei den Merkmalen (D) und (E). Das Bewertungssystem stellt einen ersten Versuch dar, den subjektiven Eindruck der bewertenden Person anhand klarer Bewertungsmaßstäbe zu kontrollieren und zu objektivieren. Es weist aber noch Schwächen auf:

- Bei den beträchtlichen Unterschieden in Anzahl und Ausprägung der drei verschiedenen Schadensindikatoren (D) bis (F) auf den einzelnen Musterflächen ist eine Bewertung auf der Grundlage absoluter Häufigkeiten nicht zielführend, sondern kann sogar zu Verzerrungen führen.
- Es bleibt unklar, welchen Anteil an der Bewertung die begrenzte Anzahl von Fotografien des Vor- und Nachzustands im Verhältnis zur direkten mikroskopische Betrachtung der Musterflächen hat.

Bewertungsstufen und Bewertungsmaßstäbe für Schadensindikatoren im mikroskopischen Maßstab:

Beurteilungskriterien	Bewertungsstufen und -maßstäbe				
	(++) sehr gut	(+) gut	(O) ausrei- chend	(-) schlecht	(- -) sehr schlecht
(D) Kraterränder Beurteilung der Ränder kraterförmiger Oberflächenöffnungen auf Unversehrtheit bzw. Beschädigung anhand von Indizien wie weiße und scharfe Bruchkanten.		ausschließ- lich intakte Ränder	vorwiegend intakte Rän- der (< 10 nicht intakt)	intakte und nicht intak- te Ränder (> 10 nicht intakt)	keine intak- ten Ränder
(E) Quarzkornumgebung Beurteilt wird die Unversehrtheit bzw. Beschädigung der unmittelbaren Umgebung der Zuschlagkörner. Indizien: Verletzungen stellen sich oft als umlaufende, helle Gräben dar.	keine Grä- ben		Einige he- rausgepräg- te Quarzkör- ner vorhan- den (zählbar, d.h. < 10 Stk.)		Viele he- rausgepräg- te Quarzkör- ner vorhan- den (nicht zählbar, d.h. > 10 Stk.)
(F) Aufstehende Zuschlagkörner Beurteilt wird das Vorhandensein oder der Verlust der vor der Reinigung dokumentierten Zuschlagkörner.		vorhanden		nicht mehr vorhanden	

In der 3. Untersuchungsphase 2004/2005 wurde von Bernitz auf dieser Grundlage ein deutlich komplexeres Bewertungssystem erarbeitet.⁶⁴ Die Beurteilung basiert erstmals ausschließlich auf dem Vergleich ausschnittsidentischer Mikrofotos vor und nach einer Reinigung. Die direkte mikroskopische Betrachtung der Musterflächen fließt nicht mehr in die Bewertung des Schädigungsgrades ein.

In einem zweistufigen System wird zunächst jedes dokumentierte Einzelphänomen anhand eines neu definierten Maßstabes in eine von maximal 5 Bewertungskategorien eingeordnet. In einem zweiten Schritt werden die Einzelbewertungen für jeden Schadensindikator nach einem bestimmten Schlüssel zusammengeführt. Die Einführung einer differenzierten Einzelbewertung für jedes untersuchte Oberflächenphänomen trug der deutlich geringeren Schadensintensität der von Bernitz untersuchten Strahlmittel und den verfeinerten Möglichkeiten der vergleichenden Untersuchung von Mikrofotos im Vor- und Nachzustand Rechnung. Mit einem dualen Kategoriensystem des Typs „beschädigt“ / „nicht beschädigt“ hätten nach Auffassung der Autorin die relativ geringen Unterschiede im Schädigungsgrad nicht mehr hinreichend herausgearbeitet werden können.⁶⁵

Durch zusätzliche Tendenzangaben bei der Bewertungskategorie (O / ausreichend) ist eine feine Bewertungsabstufung möglich. Bemerkenswert ist die Ausweitung des Begriffs Krater auf jedwede Öffnung, wodurch nun auch robustere Oberflächenstrukturen in die Bewertung aufgenommen werden können. Bernitz verwendet hierfür alternativ zum bereits eingeführten Begriff Kraterränder auch den Begriff „Ränder von Öffnungen“.

Die Nachprüfbarkeit der Einzelbewertungen ist bei Bernitz in optimaler Weise gegeben. Hierzu wurde für jede Musterfläche eine Powerpoint-Präsentation erstellt, in der die bewerteten Einzelphänomene auf den Mikrofotos des Vor- und Nachzustandes markiert und erforderlichenfalls mit entscheidungsrelevanten Zusatzinformationen versehen werden.

⁶⁴ Bernitz (2006) Untersuchungsbericht, S. 9-47

⁶⁵ Bernitz (2006) Untersuchungsbericht, S. 17

Bewertungskategorien zur Einzelbeurteilung von Schadensindikatoren⁶⁶:

Beurteilungskriterien	Bewertungsstufen und Maßstäbe für die Einzelmerkmalbeurteilung				
	(++) sehr gut	(+) gut	(O) ausrei- chend	(-) schlecht	(--) sehr schlecht
<p>(D) Kraterränder</p> <p>Die Ränder der Oberflächenöffnungen werden auf ihre Unversehrtheit bzw. Beschädigung hin beurteilt.</p> <p>Bewertet werden verschiedenste Formen und Größen von Öffnungen: Krater, flache Vertiefungen, kleinste Löcher und Ränder bspw. von Einschnitten, die keinen geschlossenen Rand haben.</p>	<p>intakt</p> <p>(Konturen bis in kleinste Details erhalten)</p>	<p>minimale Verluste</p> <p>(kaum wahrnehmbare Veränderungen)</p>	<p>vorwiegend intakt, < 50% nicht-intakt</p> <p>(gut sichtbare Veränderung, Krater leicht erweitert, kleine Details z.T. verloren und z.T. wieder auffindbar, oft vorhandener Kraterrandwulst noch erhalten)</p>	<p>vorwiegend nicht intakt, > 50%</p> <p>(Kontur nicht mehr wiederzuerkennen, Form komplett verändert, an allen Ränderseiten Verluste)</p>	<p>zerstörter Kraterrand</p> <p>(helle und scharfe Bruchkanten)</p>
<p>(E) Quarzkorn und –umgebung</p> <p>Beurteilt wird die Unversehrtheit bzw. Beschädigung der unmittelbaren Umgebung der Zuschlagkörner. Indizien: Verletzungen stellen sich oft als umlaufende, helle Gräben dar.</p>	<p>Korn intakt, keine Gräben</p> <p>(Der eigentliche Kornkörper und die nähere Umgebung sind völlig unversehrt).</p>		<p>Korn intakt oder zugerundet, Umgebung mit leichten Verlusten</p> <p>(Form und Größe des Kornes sind leicht reduziert (kleiner, zugerundete Form etc.), gut sichtbare Veränderung, kleine Details sind verloren)</p>		<p>stark ausgeprägte weiße, breite Gräben</p> <p>(Verletzungen der Oberfläche in Form von Ausbrüchen, die sich hell (weiß) absetzen, Quarzkorn wirkt wie herauspräpariert (Gräben))</p>
<p>(F) Aufstehende Zuschlagkörner</p> <p>Beurteilt wird das Vorhandensein, eine Beschädigung oder der Verlust der vor der Reinigung dokumentierten Zuschlagkörner.</p>		<p>vorhanden, sehr gut erhalten</p> <p>(Das dokumentierte Zuschlagkorn ist in Form und Gestalt vollständig erhalten – vollkommen intakt)</p>	<p>nicht vollständig erhalten</p> <p>(Das dokumentierte Zuschlagkorn ist in Form und Größe deutlich reduziert. Reste des Zuschlagkornes sind vorhanden.)</p>	<p>nicht mehr vorhanden</p> <p>Das dokumentierte Zuschlagkorn ist nicht mehr vorhanden.</p>	

Der zweite Bewertungsschritt, die Zusammenführung der Einzelbewertungen eines Merkmals zu einer Gesamtbewertung, wird nur vorgenommen, wenn mindestens 3 Einzelphänomene je Musterfläche vorliegen. Je Schadensmerkmalkategorie und Bewertungsstufe wird hierzu die Anzahl der zugeordneten Einzelphänomene aufaddiert. Die Bewertungsstufe mit der (absoluten) Mehrheit aller beurteilten Phänomene bestimmt die Gesamtbewertung. Unter Berücksichtigung der Tendenzbewertungen bei den Einzelmerkmalen kann auch das Gesamtergebnis eine zusätzliche Kennzeichnung mit einer Tendenz aufweisen.⁶⁷

⁶⁶ Bernitz (2006) Untersuchungsbericht, S. 16, 25; 37 und 42; die Tabelle wurde unter leichten Veränderungen aus den genannten Seiten kompiliert; die bei Bernitz in der Tabelle gegebenen Nachzustandsbildbeispiele wurden bewußt nicht übernommen, da nur die vergleichende Darstellung von Vor- und Nachzustand aussagekräftig ist. Solche Bildpaare sind bei Bernitz auf S. 26-28, 38 f. und 43 f. abgebildet.

⁶⁷ Bernitz (1996) Untersuchungsbericht, S. 18

In der letzten Untersuchungsphase 2006 wurde von D´ham ein stark vereinfachtes Bewertungssystem mit nur 2 Kategorien etabliert. Dies erschien angesichts der relativ großen Anzahl von 26 neuen Musterflächen, die innerhalb kurzer Zeit zu bewerten waren, unumgänglich.

Für jedes einzelne fotografisch dokumentierte Merkmal war eine Entscheidung zwischen den beiden Kategorien

- eindeutig verändert oder
- nicht verändert bzw. nicht eindeutig verändert

zu treffen. Die Anzahl der eindeutig veränderten Einzelphänomene wurden tabellarisch erfasst, gleichfalls die Anzahl der auf jedem Mikrofoto reinigungsbedingt neu entstandenen Krater.

Die Summen der dokumentierten Einzelmerkmale im Vorzustand und der reinigungsbedingt veränderten Einzelmerkmale wurden ermittelt und zueinander in Beziehung gesetzt. Das Ergebnis dieser Auswertungsoperationen sind Angaben, wie viel Prozent der beobachteten Merkmale für die drei Schadensindikatoren Krateränder, Quarzkörner / -umgebungen und aufstehende Körner reinigungsbedingte Veränderungen erfahren haben und wie viel neue Krater nach der Reinigung im Bezug auf die Gesamtzahl der im Vorzustand dokumentierten Krater sichtbar sind. Es wurden alle Merkmale auf den Mikrofotos, die hinreichend groß und präzise abgebildet waren, ausgewertet (mitunter mehr als 10 Merkmale auf einem Mikrofoto). Die angestrebte Mindestanzahl von 10 Einzelmerkmalen je Schadensindikatorsklasse und Reinigungsmuster wurde meist deutlich überschritten. Zusätzlich wurde die Gesamtzahl aller veränderten Merkmale mit der Gesamtzahl der beobachteten Merkmale im Vorzustand ins prozentuale Verhältnis gesetzt.

Eine Umformung der prozentualen Ergebnisse in Noten nach einem einheitlichen oder nach Schadensmerkmalen differenzierten Benotungsschlüssel wurde nicht vorgenommen, zum einen, um den Informationsgehalt nicht zu reduzieren, zum anderen, um eine flexible, objektspezifische Ergebnisbewertung nicht zu erschweren.

Ein Beispiel für die Auswertestruktur gibt die folgende Tabelle.

Tabellenstruktur zur Auswertung reinigungsbedingter Veränderungen:

Orientierung		Anzahl der ausgewerteten Phänomene			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene im Vergleich zum Vorzustand			
Nr.	Position	Krateränder	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränderveränderungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornumgebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	B1	0	1	0	0	3	0	0
2	B1-2	1	1	1	1	2	0	0
3	JK2	2	1	0	2	1	1	0
4		etc.	etc.	etc.	etc.	etc.	etc.	etc.
23	I12	3	0	2	3	1	0	2
Summe 1		56	13	15	45	21	1	11
Summe 2		84			78			
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]					80	38	8	73
Veränderungen gesamt [%]					93			

Durch die personelle Trennung der Arbeitsschritte (praktische Ausführung der Reinigung durch Daniel Ossig, Student der Restaurierung an der FHP, Dokumentation und Bewertung durch D´ham) konnte die Untersuchung als Blinduntersuchung durchgeführt werden, also in Unkenntnis des jeweils angewendeten Reinigungsverfahrens und seiner Parameter. Eine Beeinflussung der Untersuchungsergebnisse durch mögliche Voreingenommenheiten konnten auf diese Weise vermieden werden.

5.4.3 Praktikabilität (Wirtschaftlichkeit, Gesundheitsaspekte)

Neben der Frage, ob und ggf. in welchem Grade reinigungsbedingte Schäden entstehen und wie das Reinigungsergebnis nach ästhetischen Kriterien zu beurteilen ist, interessieren bei der Auswahl eines objektspezifisch geeigneten Reinigungsverfahrens selbstverständlich auch praktische Gesichtspunkte wie

Zeitaufwand, Maschinen- und Materialkosten sowie gesundheitliche Gefährdungen und Arbeitskomfort für die Ausführenden.

Die Wirtschaftlichkeit eines Verfahrens bemisst sich nach den erforderlichen Gesamtkosten zur Erzielung des gewünschten Ergebnisses. Neben den Kosten für die erforderlichen Reinigungsgerätschaften und Reinigungsmittel (z.B. Strahlgüter) fallen v. a. Personalkosten ins Gewicht. Die erforderliche Arbeitszeit wird vor allem von der erzielbaren Flächenleistung der gewählten Kombination aus Reinigungsverfahren, Verfahrensparametern und Reinigungsmitteln bestimmt. Zusätzliche Arbeitszeit wird für vor- und nachbereitende Arbeitsschritte benötigt, deren Umfang ebenfalls verfahrensabhängig unterschiedlich ausfällt. Zu nennen sind etwa der Aufwand für ein Vorfeuchten von Ablagerungen bei den Kombinationsverfahren (Feuchtreinigung mit anschließendem Partikelstrahlen) und der Flusssäurereinigung oder die Nachreinigung des Objektes und die sachgerechte Entsorgung der Reinigungsmittel.

Die im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführten systematischen Reinigungsversuche wurden stets auf Flächen ähnlicher Größe durchgeführt. Damit kann die Zeitdauer, die für den eigentlichen Reinigungsvorgang (ohne Nebenarbeiten) benötigt wurde und bei der Ergebnispräsentation in Kapitel 4 jeweils tabellarisch ausgewiesen wird, direkt miteinander verglichen oder aber auf m² hochgerechnet werden. Es sind jedoch wechselnde Auflagerungseigenschaften auf den Musterflächen zu bedenken, so dass die ermittelten Daten zur Reinigungsdauer nur grobe Anhaltspunkte bieten.

Weitere praktikabilitätsrelevante Sachverhalte wurden nicht quantitativ erfasst, sondern fließen als Bemerkungen in die Ergebnisdarstellung ein.

5.4.4 Zusammenführung der Einzelbeurteilungen zum Gesamtergebnis

Hinsichtlich einer Gesamtbeurteilung der Reinigungsverfahren, -parameter und -mittel wurden in den einzelnen Projektphasen unterschiedliche Ziele und Konzepte verfolgt.

In der 2. und 3. Untersuchungsphase 2003/2004 und 2004/2005 bestand die Hauptzielsetzung einer Gesamtbewertung in der konkrete Empfehlung eines Strahlmittels für die Reinigung der Objektgruppe Amphoren der Neuen Orangerie Potsdam. Hierzu wurde zunächst die Gleichrangigkeit aller ästhetischen und schadensrelevanter Beurteilungskriterien (A) bis (F) vorausgesetzt und darauf basierend eine Rangfolge der verschiedenen Verfahrensalternativen erstellt. Strahlmittel-Strahlparameter-Kombinationen, die in einem oder mehreren Bewertungskategorien eine schlechte Beurteilung erhalten hatten, wurden von vorne herein als nicht anwendbare Verfahren ausgeschlossen.

In der 4. Projektphase 2006 wurden andere Akzente gesetzt. Während das trocken-abrasive Mikropartikelstrahlverfahren den ausschließlichen Gegenstand der vorangegangenen Untersuchungsetappen bildete, waren nun Bewertungen höchst unterschiedlicher Reinigungsverfahren zu integrieren, auf die das angewendete Untersuchungs- und Bewertungsinstrumentarium nicht in jedem Fall optimal abgestimmt werden konnte. Zudem hatte die frühere Zielstellung einer konkreten Maßnahmenempfehlung für die Amphoren der Neuen Orangerie durch den Gang der Ereignisse an Bedeutung verloren.⁶⁸ Wichtiger wurde dagegen die Frage, wie das Bewertungssystem möglichst flexibel zu gestaltet ist, um damit die Untersuchungsergebnisse des Projektes auch für weitere Objekte nutzbar machen zu können.

Voraussetzung für eine flexiblere Nutzung der Untersuchungsergebnisse war die Aufgabe des Prinzips der Gleichrangigkeit aller Beurteilungskriterien. Nach Auffassung des Autors ist die Gewichtung der einzelnen Bewertungskriterien stets auch abhängig vom konkreten Objekt und den konkreten Rahmenbedingungen einer geplanten Maßnahme und muss daher unter Einbeziehung aller fachlich Beteiligten jeweils neu festgelegt werden. So hängt etwa die Gewichtung des Kriteriums Reinigungsgrad entscheidend von der konservatorischen Problemstellung und dem räumlichen Abstand des Betrachters zum Objekt ab. Daher erschien auch die Angabe einer Rangfolge immer nur im Hinblick auf ein konkretes Reinigungsvorhaben sinnvoll.

Aus den genannten Gründen werden sämtliche Untersuchungs- und Beurteilungsergebnisse einschließlich der erforderlichen Reinigungsdauer ohne Ausweisung einer Rangordnung tabellarisch gelistet. In einer weiteren Spalte wird vermerkt, ob ergänzende Untersuchungen zum Nachweis einer geringen Objektgefährdung vor einer konkreten Objektanwendung erforderlich erscheinen.

⁶⁸ Auf der Basis der vom Bernitz erarbeiteten Untersuchungsergebnisse wurden 2005 das Modellobjekt 1 (Amphore) und einige weitere Amphoren der Neuen Orangerie Potsdam von den Diplom-Restauratoren (FH) Tom Zimmermann und Eckhart Böhm im Mikrotrockenstrahlverfahren mit Steinpudermehl gereinigt.

5.4.5 Diskussion der Bewertungsmethoden

Die von D'ham vorgenommene Reduzierung bei der Bewertung einzelner Schadensmerkmale auf die beiden Kategorien „verändert“ – „nicht verändert“ stellt zweifellos eine Vergrößerung des differenzierten Bewertungssystems von Bernitz dar, da die höchst unterschiedliche Qualität der Veränderungen von minimalen Substanzverlusten bis hin zu einer vollständigen Zerstörung des Merkmals nicht mehr aufgelöst wird. Unter der praxisbezogenen Perspektive, dass für die Reinigung denkmalgeschützter Objekte ohnehin nur sehr schonende Reinigungsverfahren in Frage kommen, stellt dies jedoch keinen Nachteil dar. Durch die duale Bewertungsstruktur tritt gleichsam eine logarithmischer Effekt ein, durch den der besonders interessierende Bereich zu Beginn der Schadensskala (schadensfrei bis schadensarm) gespreizt, während der liegende Bereich stärkerer Schäden gestaucht wird. Weitere Vorteile dieser Methode in der guten statistischen Absicherung aufgrund der relativ hohen Anzahl der bewerteten Merkmalsausprägungen, und damit auch in der Robustheit gegenüber einzelnen Fehlentscheidungen.

5.5 Diskussion des Versuchsaufbaus und Fehlerbetrachtung

Im Mittelpunkt der Studie steht die Untersuchung verschiedener Strahlmittel hinsichtlich ästhetischer Reinigungswirkung und reinigungsbedingter Schäden bei Anwendung der trocken-abrasiven Mikropartikelstrahlreinigung und der feucht-abrasiven Rotationspartikelstrahlverfahrens JOS, z.T. in Kombination mit einer Vorbefeuchtung der zu reinigenden Flächen. Da etwaige Objektschäden durch Partikelstrahlverfahren vornehmlich mechanischer Natur sind, erschien die Auflichtmikroskopie als eine adäquate, zudem für Restauratoren gut zugängliche Untersuchungsmethode zur Evaluierung des Schädigungspotenzials. Allerdings ist auf die Maßstabsgebundenheit der mittels Stereomikroskopie gewonnenen Erkenntnisse hinzuweisen: winzige Beschädigungen etwa von Kornoberflächen, die durch Vergrößerung der spezifischen Oberfläche sehr wohl praxisrelevant sind und etwa zu einer beschleunigten Neuverschmutzung beitragen können, sind nur bei Betrachtung mit dem Rasterelektronenmikroskop zu erkennen. Eine umfassende Beurteilung chemischer Reinigungsverfahren allein mit mikroskopischen Methoden ist ohnehin nicht möglich. Hier müßten noch zusätzliche Untersuchungen vorgenommen werden.⁶⁹

Die Praxis zeigt, daß eine objektive Bewertung nicht möglich ist. Die Handhabung von Bewertungsmaßstäben unterliegt Schwankungen in Abhängigkeit von Tagesform bzw. aktueller körperlicher, geistiger und seelischer Verfassung des Beurteilenden. Dies gilt selbst bei Anwendung des vom Autor favorisierten Auswerteschemas, sich auf die Klassierung einzelner Schadensmerkmale in die Kategorien „eindeutig verändert“ oder „nicht verändert oder nicht eindeutig verändert“ zu beschränken. Auch hier bieten sich aufgrund der beschränkten Bildqualität der Mikrofotos und der z.T. geringen Größe der beobachteten Merkmalsausprägungen Ermessensspielräume. Zudem ist damit zu rechnen, daß die zu treffenden Beurteilungen immer auch personengebunden sind.

Die Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse aus verschiedenen Projektphasen wird auch durch methodische Unterschiede in der Bewertungsdurchführung eingeschränkt. Daher wurden vom Autor die Reinigungsfelder der Projektphase 2005 nochmals nach jüngstem Bewertungsschema beurteilt, wobei aufgrund der relativ geringen Anzahl von Mikrofotopaaren und abgebildeten Schadensindikatoren die Vergleichbarkeit begrenzt bleibt. Zu den Testflächen der Projektphasen 2003 und 2004 lagen dem Autor keine mikroskopischen Bildpaare von Vor- und Nachzustand vor. Hier könnte nur eine Versuchswiederholung Abhilfe schaffen, was innerhalb der verbleibenden Projektlaufzeit aus zeitlichen Gründen nicht mehr möglich war. Angesichts der meist außerordentlich schlechten Bewertung der hiervon betroffenen Strahlmittel in Reinigungsergebnis und Schädigungspotential scheint allerdings fraglich, ob sich die Mühe einer Versuchswiederholung lohnen würde. Dies betrifft auch die auf Gipsentfernung zielenden chemischen Reinigungsmethoden mit sehr geringen Reinigungseffekten, die bisher mit keinem der vorgenannten Bewertungsschemata beurteilt wurden.

Auf die Inhomogenität des Prüfkörperkollektives in Scherbenoberfläche und Auflagerungsbeschaffenheit wurde bereits mehrfach hingewiesen. Anstatt mit jedem untersuchten Reinigungsverfahren nur eine Testfläche zu reinigen, wäre es freilich methodisch günstiger gewesen, 3 bis 5 im Format kleinere Reinigungsmuster je Reinigungsverfahren anzulegen, wobei die Zuweisung der Reinigungsverfahren zu Musterflächen am besten über Zufallszahlen hätte erfolgen können. Eine weitere Alternative zur Feststellung und Beurteilung des Schadenspotenzials wäre die Durchführung von Reinigungsversuchen auf einheitli-

⁶⁹ Zumindest eine ergänzende Untersuchung des Salzgehaltes erscheint notwendig.

chen Oberflächen ohne jede Auflagerungen gewesen. Die ästhetische Reinigungswirkung ließe sich dagegen nach wie vor nur an patinierten Oberflächen erfassen. Jedoch ist ohnehin anhand der Reinigungsergebnisse an den recht kleinen Musterflächen eine Abschätzung der optischen Wirkung auf größeren Objektflächen nur begrenzt möglich.

Auch die Beurteilung des Reinigungsergebnisses nach ästhetischen Kriterien ist nach Auffassung des Autors noch nicht ganz ausgereift. Reinigungsgrad, Gleichmäßigkeit und mit bloßem Auge sichtbare Verletzungen stellen keine diskreten, von einander vollkommen unabhängige Merkmale dar, sondern stehen zumindest teilweise in wechselseitiger Abhängigkeit: So wird die Reinigungsintensität auf einer gleichmäßig gereinigte Fläche tendenziell besser beurteilt als auf einer stark ungleichmäßig gereinigten. Ferner könnten die Bewertungsmaßstäbe noch eindeutiger definiert werden. So ist nicht festgelegt, ob im Falle eines sehr ungleichmäßigen Reinigungsergebnisses der Reinigungsgrad nach der geringsten, der höchsten oder einer gemittelten Reinigungsintensität zu bewerten ist. Das Kriterium mit bloßem Auge sichtbare Verletzungen, das ohnehin mikroskopisch verifiziert werden muß, könnte wegfallen, wenn eine Bewertung des Schädigungsgrades mittels Mikrofotovergleich vor und nach der Reinigung vorgenommen wird. Auch ist es nicht immer möglich, Unterschiede in Helligkeit und Farbigkeit des Scherbens, wie sie in dem relativ inhomogenen Prüfkörperkollektiv der Gitterelemente anzutreffen sind, eindeutig von gutem odermäßigem Reinigungsgrad zu unterscheiden. Zusätzliche Farbmessung vor und nach der Reinigung könnten das Ziel, ein möglichst objektive und nachprüfbar Bewertung der Reinigungswirkung zu ermöglichen, unterstützen.

6 Ergebnisse systematischer Reinigungsversuche an Probekörpern

6.1 Ergebnisse der Reinigungsversuche an Prüfkörpern des Typs Albanisches Gitter

6.1.1 Reinigungserfolg

Die Bewertung des Reinigungserfolges an den Testfeldern des Typs Albanisches Gitter hinsichtlich der ästhetischen Kategorien Reinigungsintensität, Gleichmäßigkeit und mit bloßem Auge erkennbare Oberflächenverletzungen wurden im direkten Vergleich der Musterflächen untereinander vorgenommen. Alle Reinigungsmuster sind im Anhang abgebildet (Kap. 12). Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefaßt. Den Unterschieden in der Bewertung durch Bernitz / Jacobsen (2004) sowie Bernitz (2006) zu den Bewertungen durch den Autor des vorliegenden Berichtes wird mittels separater Ergebnisspalten Rechnung getragen. Bewertungsdifferenzen sind durch Unterlegung der betreffenden Tabellenfelder mit Gelb kenntlich gemacht.

A	B	C	E	F	G	H	I J K			L M N		
Nr.	Musterfläche	Ausführung	Reinigungsverfahren	Reinigungsmittel	Partikelgröße	Strahl- druck	Bewertung Bernitz u. Jacobsen und Bernitz			Bewertung D'ham		
							Reinigungs- intensität	Gleich- mäßigkeit	sichtbare Verletzungen	Reinigungs- intensität	Gleich- mäßigkeit	sichtbare Verletzungen
1	42 b 2	2004	Mikrotrocken	Granatsand	10-60 µm	0,5	+	o	+	+	o	+
2	42 b 1	2004	Mikrotrocken	Granatsand	10-60 µm	1	+	+	+	+	+	+
3	39 b 1	2003	Mikrotrocken	Edelkorund 360	21-24 µm	0,5	o	+	+	o	o	+
4	39 b 2	2003	Mikrotrocken	Edelkorund 360	21-24 µm	1	o	+	+	o	+	+
5	39 a 1	2003	Mikrotrocken	Edelkorund 600	8-10 µm	0,5	o	+	+	o	+	+
6	39 a 2	2003	Mikrotrocken	Edelkorund 600	8-10 µm	1	o	+	+	o	+	+
7	53 b 1	2005	Mikrotrocken	Edelkorund 600	8-10 µm	0,5	+	o	+	+	o	+
8	53 b 2	2005	Mikrotrocken	Edelkorund 600	8-10 µm	1	+	o	+	+	o	+
9	58 a1a	2005	Mikrotrocken	Edelkorund 1200	2-4 µm	0,5	-	-	+	-	--	+
10	58 a1b	2005	Mikrotrocken	Edelkorund 1200	2-4 µm	1	o	o	+	o	o	+
11	58 a 2	2005	Mikrotrocken	Edelkorund 1200	2-4 µm	1,5	+	o	+	+	+	+
12	38 a 2	2003	Mikrotrocken	Glasperlen 6	90-150 µm	0,5	o	-	--	o	-	--
13	38 a 1	2003	Mikrotrocken	Glasperlen 6	90-150 µm	1	+	-	--	o	-	--
14	38 b 1	2003	Mikrotrocken	Glasperlen 9	10-50 µm	0,5	o	o	-	o	o	-
15	38 b 2	2003	Mikrotrocken	Glasperlen 9	10-50 µm	1	+	+	-	+	+	-
16	40 a 1	2003	Mikrotrocken	Glasbruch Nr. 54	250-500 µm	0,5	-	--	--	o	-	--
17	40 a 2	2003	Mikrotrocken	Glasbruch Nr. 54	250-500 µm	1	-	--	--	o	--	--
18	40 b 1	2003	Mikrotrocken	Glasbruch Nr. 100	110-210 µm	0,5	+	o	--	+	o	--
19	40 b 2	2003	Mikrotrocken	Glasbruch Nr. 100	110-210 µm	1	o	o	--	o	o	--
20	46 b 1	2004	Mikrotrocken	Hohlglaskugeln S 22	29-53 µm	0,5	-	--	-	-	--	-
21	46 b 2	2004	Mikrotrocken	Hohlglaskugeln S 22	29-53 µm	1	+	+	-	+	+	-
22	46 a 1	2004	Mikrotrocken	Bodenkalk	300-1000 µm	0,5	+	o	-	o	o	-
23	46 a 2	2004	Mikrotrocken	Bodenkalk	300-1000 µm	1	+	+	-	+	o	-
24	68 b 1	2005	Mikrotrocken	Steinpudermehl	5-300 µm	0,5	-	+	+	o	o	+
25	68 b 2	2005	Mikrotrocken	Steinpudermehl	5-300 µm	1	o	+	+	+	+	+
26	42 a 2	2005	Mikrotrocken	Gaspudermehl mikrofein	40-80 µm	0,5	-	o	+	-	--	+
27	42 a 1	2005	Mikrotrocken	Gaspudermehl mikrofein	40-80 µm	1	o -	o	+	o	-	+
28	58 b 1	2006	Mikrotrocken	Gaspudermehl mikrofein	40-80 µm	0,5				+	o	+
29	43 b 2	2006	JOS	Granatsand	10-60 µm	0,5				+	o	+
30	43 b 1	2006	JOS	Edelkorund 600	8-10 µm	0,5				+	o	+
31	43 a 1	2006	JOS	Steinpudermehl	5-300 µm	0,5				+	+	+
32	43 a 2	2006	JOS	Gaspudermehl mikrofein	40-80 µm	0,5				+	+	o
33	57 a 2a	2006	JOS	Weichstrahlmittel S	100-250 µm	1				-	--	o
34	57 a 2b	2006	JOS	Weichstrahlmittel S	100-250 µm	1,5				-	--	-
35	64 a,a	2006	Nebulizzatore - JOS	Wasser / Edelkorund 600	8-10 µm	0,5				o	-	+
36	64 a,b	2006	Wasserbad - JOS	Wasser / Edelkorund 600	8-10 µm	0,5				o	-	+
37	65 a 1	2006	Kompresse - JOS	Ethanol / Wasser - Ek 600	8-10 µm	0,5				-	--	+
38	65 a 2	2006	Heißdampf - JOS	Wasser / Edelkorund 600	8-10 µm	0,5				o	-	+
39	55 b 1	2006	Laser	1064 nm, ohne Benetzung	120-160 mJ, Fokus 3					o	-	+
40	55 b 2	2006	Laser	1064 nm, ohne Benetzung	> 230 mJ, Fokus 6					+	+	+
41	56 b 1	2006	Laser	1064 nm, mit Benetzung	120-160 mJ, Fokus 3					o	-	+
42	56 b 2	2006	Laser	1064 nm, mit Benetzung	> 230 mJ, Fokus 6					+	o	+
43	58 b 2	2006	Flusssäure	Tropexin / Wasser = 1:3 VT						+	o	o
44	64 b	2006	Flusssäure	3 M.-%-(NH ₄)HF ₂ -Lösung						+	+	+
45	66 b 1	2006	Flusssäure	1 M.-%-HF-Lösung						+	o	+

Bewertung des Reinigungserfolgs an den Musterflächen des Prüfkörpertyps Albanisches Gitter

In der Bewertung durch den Autor dieses Berichtes ergeben sich folgende Ergebnisse:
 Erwartungsgemäß steigt die Reinigungsintensität bei vielen Strahlmitteln mit steigendem Luftdruck an.
 Gleiches gilt häufig für die Gleichmäßigkeit des Reinigungsergebnisses und auch bezüglich der Energiedichte im Falle des Laserstrahlverfahrens. Die besten Ergebnisse mit guten Bewertung in allen drei Beurteilungskategorien erzielen folgende Verfahren:

- o im Mikrotrockenstrahlverfahren Granatsand (1,0 bar)
- Edelkorund 1200 (1,5 bar)
- Steinpudermehl (1,0 bar)
- o im JOS-Verfahren
- Steinpudermehl (0,5 bar)
- o im Laserstrahlverfahren ohne Benetzung, hohe Energiedichte
- o mittels Flusssäure-haltigen Lösungen 3 M.-%-(NH₄)HF₂-Lösung

Bei Verwendung im Mikrotrockenstrahlverfahren erhielten gute (+) bis akzeptable (O) Bewertungen Edelkorund 600 (0,5 und 1,0 bar), Edelkorund 360 und Glasperlen 9 (1,0 bar) sowie Granatsand und Glaspudermehl mikrofein (0,5 bar), wobei im Falle von Glaspudermehl mikrofein widersprüchliche Ergebnisse vorliegen (Zeile 30 und 32).

Sofern die genannten Strahlgüter auch im feucht-abrasiven JOS-Verfahren eingesetzt wurden, ergaben sich weitgehend gleiche Beurteilungen. Gute bis akzeptable Bewertungen erhielten ferner Laserstrahlung bei hoher Energiedichte und Befeuchtung der Oberfläche sowie die beiden weiteren flusssäurehaltigen Reinigungslösungen (Zeile 47 und 49).

Die Strahlmittel Glasperlen 9, Hohlglaskugeln S 22, Bodenkalk (1,0 bar) und Glasbruch 100 (0,5 bar) mußten hingegen - bei ebenfalls guten bis akzeptablen Bewertungen in den Kriterien Reinigungsintensität und Gleichmäßigkeit - in der Kategorie mit bloßem Auge sichtbaren Verletzungen mit schlecht (-) oder sogar sehr schlecht (- -) beurteilt werden.

Die Kombinationsverfahren aus Vorbefeuchtung der Auflagerungen und anschließendem feucht-abrasiven Partikelstrahlen im JOS-Verfahren (Zeile 43-46) schnitten insbesondere hinsichtlich der Gleichmäßigkeit erstaunlich schlecht ab, obwohl sämtliche Kombinationsverfahren bei Vortests sehr viel versprechende Ergebnisse gezeigt hatten, nämlich ein gutes Reinigungsergebnis bei deutlich verringerter Strahldauer. Die Ursachen hierfür sind noch nicht zwingend geklärt.

Besonders unzureichende Reinigungseffekte hinsichtlich Intensität und Gleichmäßigkeit waren bei Verwendung von Edelkorund 1200, Hohlglaskugeln S 22 und Glaspudermehl mikrofein im Mikrotrockenstrahlverfahren bei 0,5 bar sowie bei Weichstrahlmittel S im JOS-Verfahren bei 1 und 1,5 bar zu verzeichnen.

Soweit Differenzen zwischen den Bewertungen durch Bernitz und Jakobsen (2004) bzw. Bernitz (2006) und dem Autor bestehen, betragen sie eine Bewertungsstufe (Ausnahme Zeile 30 mit 2 Bewertungsstufen). In der Kategorie „mit bloßem Auge sichtbare Verletzungen“ herrscht stets vollkommene Übereinstimmung. Da sich Reinigungsintensität und Gleichmäßigkeit zwischen den Bewertungsstufen gut (+) oder ausreichend (O) nur um Nuancen unterscheiden, sind entsprechende Bewertungsunterschiede nach Auffassung von D'ham von geringer praktischer Bedeutung. Sie zeigen aber, daß das selbst gesteckte Ziel, die Bewertung so zu objektivieren, daß sie unabhängig von der subjektiven Auffassung des Beurteilenden wird, noch nicht ganz erreicht ist. Es erscheint fraglich, ob dieses Ziel angesichts der Heterogenität der Probekörperoberflächen überhaupt zu erreichen ist.

Abweichende Ergebnisse werden auch bei Wiederholungen von Reinigungstests in den verschiedenen Projektphasen erzielt (Edelkorund 600, Zeile 5-8; Glaspudermehl mikrofein, Zeile 30 und 32). Irritierend sind die eklatanten Differenzen bei der Bewertung des Strahlmittels Glaspudermehl mikrofein (0,5 bar, Mikrotrockenstrahlreinigung). Mögliche Erklärungen sind ebenfalls Unterschiede in den Scherben- und Auflagerungseigenschaften innerhalb des Prüfkörperkollektivs Gitterelemente sowie die wechselnde Geschicklichkeit derjenigen, die die Reinigung ausführen.

6.1.2 Schädigungsgrad

Die Ergebnisse der Projektphasen 2005 und 2006 nach Maßgabe des jüngsten Systems zur Kategorisierung reinigungsbedingter Schäden sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

DBU-Projekt Az 21627-45 Terrakotta

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	
Nr. Zeile	Nr. Reinigungsmuster	Untersuchungsphase	Angaben zur Reinigung				Anzahl n ₁ der ausgewerteten Phänomene				Anzahl n ₂ der eindeutig veränderten Phänomene					Prozentuale Veränderungen im Verhältnis zum Zustand vor der Reinigung				
			Reinigungsverfahren	Reinigungsmittel	Partikelgröße	Parameter	Krater-ränder	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Gesamtzahl	Krater-rand-Veränderungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornumgebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner	Gesamtzahl	Krater-rand-Veränderungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornumgebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner	gesamt
							[Stück]	[Stück]	[Stück]		[Stück]	[Stück]	[Stück]	[Stück]		[Stück]	[Stück]	[Stück]	[Stück]	
1	53 b I	2005	Mikro-trocken	Edelkorund 600	8-10 µm	0,5 bar	20	18	2	40	8	1	0	0	9	40	5	0	0	23
2	53 b II	2005	Mikro-trocken	Edelkorund 600	8-10 µm	1,0 bar	16	7	3	26	9	3	0	1	13	56	19	0	33	50
3	58 a I	2005	Mikro-trocken	Edelkorund 1200	2-4 µm	0,5 + 1,0 bar	12	8	6	26	3	0	0	0	3	25	0	0	0	12
4	58 a II	2005	Mikro-trocken	Edelkorund 1200	2-4 µm	1,5 bar	11	1	4	16	5	1	0	0	6	45	9	0	0	38
5	68 b I	2005	Mikro-trocken	Steinpudermehl	5-300 µm	0,5 bar	14	0	2	16	12	4	0	0	16	86	29	0	0	100
6	68 b II	2005	Mikro-trocken	Steinpudermehl	5-300 µm	1,0 bar	17	4	4	25	9	2	0	1	12	53	12	0	25	48
7	42 a II	2005	Mikro-trocken	Glaspudermehl mikrofein	40-80 µm	0,5 bar	16	6	0	22	7	0	0	0	7	44	0	0	0	32
8	42 a I	2005	Mikro-trocken	Glaspudermehl mikrofein	40-80 µm	1,0 bar	8	2	5	15	5	1	0	0	6	63	13	0	0	40
9	58 b I	2006	Mikro-trocken	Glaspudermehl mikrofein	40-80 µm	0,5 bar	43	13	10	66	31	20	7	7	65	72	47	54	70	98
10	43 b II	2006	JOS	Granatsand	10-60 µm	0,5 bar	37	18	103	158	35	28	13	93	169	95	76	72	90	107
11	43 b I	2006	JOS	Edelkorund 600	8-10 µm	0,5 bar	51	25	146	222	4	0	0	2	6	8	0	0	1	3
12	43 a I	2006	JOS	Steinpudermehl	5-300 µm	0,5 bar	57	13	16	86	46	23	1	12	82	81	40	8	75	95
13	43 a II	2006	JOS	Glaspudermehl mikrofein	40-80 µm	0,5 bar	35	22	18	75	32	31	20	10	93	91	89	91	56	124
14	57 a II	2006	JOS	Weichstrahlmittel S	100-250 µm	0,5-1,5 bar	43	19	8	70	43	42	5	4	94	100	98	26	50	134
15	64 a,a	2006	Nebulizzatore - JOS	Wasser / Edelkorund 600	8-10 µm	0,5 bar	28	9	38	75	8	0	0	2	10	29	0	0	5	13
16	64 a,b	2006	Wasserbad - JOS	Wasser / Edelkorund 600	8-10 µm	0,5 bar	39	11	44	94	15	2	0	3	20	38	5	0	7	21
17	65 a I	2006	Kompresse - JOS	Ethanol / Wasser - Ek 600	8-10 µm	0,5 bar	28	8	43	79	10	0	0	13	23	36	0	0	30	29
18	65 a II	2006	Heißdampf - JOS	Wasser / Edelkorund 600	8-10 µm	0,5 bar	28	6	36	70	10	0	0	6	16	36	0	0	17	23
19	55 b I	2006	Laser	1064 nm, ohne Benetzung	120-160 mJ, Fokus 3		62	16	26	104	0	0	0	1	1	0	0	0	4	1
20	55 b II	2006	Laser	1064 nm, ohne Benetzung	> 230 mJ, Fokus 6		43	14	20	77	2	0	0	0	2	5	0	0	0	3
21	56 b I	2006	Laser	1064 nm, mit Benetzung	120-160 mJ, Fokus 3		35	12	65	112	0	0	0	1	1	0	0	0	2	1
22	56 b II	2006	Laser	1064 nm, mit Benetzung	> 230 mJ, Fokus 6		32	10	77	119	13	0	0	1	14	41	0	0	1	12
23	58 b IIb	2006	Flusssäure	Troplexin 1:3			57	12	13	82	22	2	2	0	26	39	4	17	0	32
24	64 b	2006	Flusssäure	3 M.-%-(NH ₄)HF ₂ -Lösung			33	17	59	109	17	3	2	2	24	52	9	12	3	22
25	66 b I	2006	Flusssäure	1 M.-%-HF-Lösung			36	16	21	73	5	0	0	0	5	14	0	0	0	7
Mittelwert															46	18	11	19	43	

Evaluierungsergebnisse reinigungsbedingter Schäden an den Musterflächen des Prüfkörpertyps Albanisches Gitter mittels Vergleichs von Mikrofotos vor und nach der Reinigung nach dualem Auswerteschema (Klassierung der Oberflächenphänomene in die beiden Kategorien „eindeutig verändert“ oder „nicht verändert / nicht eindeutig verändert“ als Bewertungsbasis)

Zunächst soll die Sensitivität der einzelnen Schadensindikatoren und damit deren Eignung für die Beurteilung des Schädigungsgrades betrachtet werden. Die am Tabellenfuß angegebenen Durchschnittsbeträge der prozentualen Veränderungen weisen für die vier Schadenskategorien sehr unterschiedliche Beträge aus.

Das Merkmal Kraterränder weist generell die höchste Empfindlichkeit auf, selbst bei solchen Reinigungsverfahren, die die Oberfläche nicht mechanisch mittels Strahlgütern beanspruchen. Zusätzliche Krater in einem signifikanten Ausmaß ($\geq 10\%$) treten erst ab einem Schwellwert in der Kategorie Kraterrandveränderungen von 50 % auf. Die Maximalwerte beider Schadensindikatoren liegen bei 100 %. Die Bewertungskategorie zusätzliche Krater liefert somit bei relativ schadensarmen Reinigungsverfahren kaum zusätzliche Informationen, ermöglicht aber eine schnelle Diskriminierung besonders schadensintensiver Reinigungsverfahren. Eine noch geringere Empfindlichkeit zeigt der Schadensindikator Quarzkörner/Quarzkornumgebungen. Erst jenseits von ca. 70 % Kraterrandveränderungen sind Beschädigungen der Kornumgebungen bei Partikelstrahlverfahren nachweisbar. Nur bei den chemischen Reinigungsmethoden mit Flusssäure sind Veränderungen an diesem, mechanisch relativ robusten Merkmal bereits unterhalb dieser Schwelle gegeben. In der Schadenskategorie eliminierte oder beschädigte aufstehende Körner sind alle Veränderungen ab 50% mit sehr hohen Veränderungsbeträgen in den beiden Schadenskategorien Kraterrandveränderungen und zusätzliche Krater korreliert.⁷⁰ Bei allen Schadensindikatoren sollte stets geprüft werden, auf vielen untersuchten Merkmalsausprägungen die ausgewiesenen Prozentbeträge beruhen. Beispielsweise sind die relativ hohen Prozentbeträge in Zeile 2 und 6 beim Merkmal aufstehende Körner nicht signifikant, da hier nur jeweils ein Korn verändert wurde.

Schließlich zeigen die Prozentsätze von Kraterrandveränderungen und Gesamtveränderung in der Tendenz eine relativ gute Übereinstimmung, wenn gleich im Detail, insbesondere bei den Reinigungsverfahren Laserstrahlreinigung und Flusssäurereinigung, größere Differenzen bestehen. Eine Beurteilung der Schadenspotentials allein auf der Grundlage des Gesamtwertes prozentualer Veränderung kann daher nicht empfohlen werden. Die prozentualen Kraterrandveränderung stellen aus den genannten Gründen die verlässlichste Beurteilungsgröße dar.

In den ersten 8 Zeilen sind die Reinigungsmuster der Untersuchungsphase 2005 aufgeführt. Die durchschnittliche Anzahl der dokumentierten Einzelphänomene beträgt bei dieser Gruppe mit 23 Stück nur etwa ein Viertel des Durchschnitts der 2006 durchgeführten Reinigungsversuche. Die Beurteilungsergebnisse sind daher als weniger verlässlich einzustufen.

Eine Reinigung mittels Laserstrahl ist erwartungsgemäß bei Einstellung geeigneter Parameter schadensfrei bzw. mit geringster, statistisch nicht signifikanter Schädigung möglich. Tendenziell ist eine geringere Energiedichte und der Verzicht auf eine Befeuchtung der Oberfläche vorteilhaft. In der Gruppe der Partikelstrahlverfahren kann ausschließlich Edelkorund 600 in Verbindung mit dem feucht-abrasiven JOS-Verfahren bei 0,5 bar Luftdruck ähnlich gute Ergebnisse erzielen. Im Mikrotrockenstrahlverfahren ist der Schädigungsgrad mit gleichem Strahlmittel deutlich größer. Hier kann nur mit der Sorte Edelkorund 1200 ein größere Schonung der Oberfläche erzielt werden. Für sämtliche anderen untersuchten Strahlmittel (Granatsand, Glaspudermehl mikrofein und Steinpudermehl), unabhängig davon, ob sie trocken-abrasiv oder feucht-abrasiv eingesetzt werden, lassen sich mikroskopisch deutlich wahrnehmbare Veränderung der Terrakottaoberfläche nachweisen. Als besonders schadungsintensiv erweist sich das Weichstrahlmittel S.

Ein Vorfeuchten der Auflagerungen, auf welche Weise auch immer, bewirkt hinsichtlich der intendierten Absenkung des Schädigungspotentials eine eindeutige Verschlechterung. Bei den chemischen Reinigungsverfahren verursacht die stark verdünnte reine Flusssäure die geringsten Veränderungen und nimmt hinter den Laserverfahren und Edelkorund 600 im JOS-Verfahren den dritten Rang ein.

⁷⁰ Eine Ausnahme bilden Zeile 17 und 18.

Vergleicht man die soeben vorgestellte Bewertung mit der Auswertung von Bernitz⁷¹ so ergibt sich folgendes Bild.

Bewertungsunterschiede hinsichtlich des Schädigungsgrades bei Bernitz und D'ham:

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Nr. Zeile	Nr. Reinigungsmuster	Untersuchungsphase	Reinigungsverfahren	Reinigungsmittel	Parameter	Kraterrandveränderungen (D'ham) [%]	zusätzliche Krater (D'ham) [%]	Kraterrandveränderungen + zusätzliche Krater (Bernitz)	beschädigte Kornumgebungen (D'ham) [%]	beschädigte Kornumgebungen (Bernitz)	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner (D'ham) [%]	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner (Bernitz)
1	53 b I	2005	Mikrotrocken	Edelkorund 600	0,5 bar	40	5	+	0	++	0	(keine)
2	53 b II	2005	Mikrotrocken	Edelkorund 600	1,0 bar	56	19	o	0	++	33	o
3 a	58 a I	2005	Mikrotrocken	Edelkorund 1200	0,5 bar	25	0	++	0	++	0	(keine)
3 b	58 a II	2005	Mikrotrocken	Edelkorund 1200	1,0 bar	25	0	+	0	(keine)	0	(keine)
4	58 a III	2005	Mikrotrocken	Edelkorund 1200	1,5 bar	45	9	o	0	(keine)	0	o
5	68 b I	2005	Mikrotrocken	Steinpudermehl	0,5 bar	86	29	o -	0	(keine)	0	o
6	68 b II	2005	Mikrotrocken	Steinpudermehl	1,0 bar	53	12	o	0	o	25	o (-)
7	42 a II	2005	Mikrotrocken	Glaspudermehl mikrofein	0,5 bar	44	0	o (-)	0	(keine)	0	-
8	42 a I	2005	Mikrotrocken	Glaspudermehl mikrofein	1,0 bar	63	13	o -	0	o	0	o

Die Schadensindikatoren beschädigte Kornumgebungen und aufstehende Körner müssen hier mangels Bewertung durch Bernitz außer Acht gelassen werden. Bei den Merkmalen Kraterrandveränderungen und zusätzliche Krater (von Bernitz nicht unterschieden) stimmt die Rangfolge von Edelkorund 1200 (0,5 bar), EK 1200 (1 bar) über EK 600 (0,5 bar) und EK 1200 (1,5 bar) zu EK 600 (1 bar) überein. Abweichungen bestehen lediglich in der Beurteilung von Glaspudermehl mikrofein (0,5 bar). Beide Bewertungsverfahren führen damit zu ähnlichen Ergebnissen.

Die nach abweichenden Bewertungsschemata ermittelten Ergebnisse der Projektphasen 2003 und 2004 zeigt die folgende Tabelle⁷²:

⁷¹ Bernitz (2006) Untersuchungsbericht, Tabelle 13, S. 58

⁷² Bernitz u.a. (2004) Projektbericht, Tabelle 6, S. 61 (verändert)

Evaluierungsergebnisse reinigungsbedingter Schäden an Musterflächen des Prüfkörpertyps Albanisches Gitter gemäß älteren Untersuchungs- und Bewertungsmethoden:

A	B	C	D	E	F	G	H		I	K	L
							Mikroskopische Bewertung			Mikroskopische Bewertung, unterstützt durch Vergleich exemplarischer Mikrofotos von Vor- und Nachzustand	
Nr.	Musterfläche	Ausführung	Reinigungsverfahren	Reinigungsmittel	Partikelgröße	Strahlendruck	Kraterränder	Quarzkornumgebungen	Kraterränder	aufstehende Zuschlagskörner	
1	42 b 2	2004	Mikrotrocken	Granatsand	10-60 µm	0,5	+	++	neg.	Verluste	
2	42 b 1	2004	Mikrotrocken	Granatsand	10-60 µm	1	+	++	neg.	Verluste	
3	39 b 1	2003	Mikrotrocken	Edelkorund 360	21-24 µm	0,5	+	++			
4	39 b 2	2003	Mikrotrocken	Edelkorund 360	21-24 µm	1	+	+ 0			
5	39 a 1	2003	Mikrotrocken	Edelkorund 600	8-10 µm	0,5	+	++			
6	39 a 2	2003	Mikrotrocken	Edelkorund 600	8-10 µm	1	+	++			
7	38 a 2	2003	Mikrotrocken	Glasperlen 6	90-150 µm	0,5	-	-			
8	38 a 1	2003	Mikrotrocken	Glasperlen 6	90-150 µm	1	-	-			
9	38 b 1	2003	Mikrotrocken	Glasperlen 9	10-50 µm	0,5	0	0 -			
10	38 b 2	2003	Mikrotrocken	Glasperlen 9	10-50 µm	1	-	-			
11	40 a 1	2003	Mikrotrocken	Glasbruch Nr. 54	250-500 µm	0,5	--	-			
12	40 a 2	2003	Mikrotrocken	Glasbruch Nr. 54	250-500 µm	1	--	--			
13	40 b 1	2003	Mikrotrocken	Glasbruch Nr. 100	110-210 µm	0,5	--	-			
14	40 b 2	2003	Mikrotrocken	Glasbruch Nr. 100	110-210 µm	1	--	-			
15	46 b 1	2004	Mikrotrocken	Hohlglaskugeln S 22	29-53 µm	0,5	0	0 +	neg.	Verluste	
16	46 b 2	2004	Mikrotrocken	Hohlglaskugeln S 22	29-53 µm	1	0	0 -	neg.	Verluste	
17	46 a 1	2004	Mikrotrocken	Bodenkalk	300-1000 µm	0,5	+ 0	+ 0	neg.	Verluste	
18	46 a 2	2004	Mikrotrocken	Bodenkalk	300-1000 µm	1	++	++	neg.	Verluste	

Ein Vergleich der Spalten H und K macht deutlich, dass Veränderungen an gereinigten Oberflächen mittels Auflichtmikroskopie ohne den systematischen Vergleich ausschnittgleicher Mikrofotos vor und nach der Reinigung nur bei schweren Verletzungen sicher zu erkennen sind. So im Falle von Granatsand, der zunächst als besonders schonender Strahlmittelfavorit galt, und sich im Vorher-Nachher-Vergleich als ein stark abrasives Medium erwies. Vor diesem Hintergrund dürfte sich bei jenen Strahlmitteln, deren hohes Schadenspotential schon bei einfacher mikroskopischer Betrachtung unverkennbar war, ein Wiederholung von Reinigungsversuchen nach neuer Untersuchungs- und Auswertemethodik erübrigen.

6.1.3 Zusammenfassung

In der folgenden Tabelle werden alle Untersuchungsergebnisse an den Probekörpern des Typus Albanisches Gitter zusammengefaßt und um die Angabe der je Reinigungsmuster benötigten Zeitdauer ergänzt. Nur eingeschränkt vergleichbare Bewertungsergebnisse aus früheren Projektphasen sind mit violetter Schraffur unterlegt. Ergebnisse, die nicht auf einem Vorher-Nachher-Vergleich von Mikrofotos beruhen, sind in grauer Schriftfarbe angegeben.

Gesamtbewertung der Reinigungsmuster des Probenotypus Albanisches Gitter:

A	B	C	D	E	F	G	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
Nr.	Musterfläche	Ausführung	Reinigungs-verfahren	Reinigungsmittel	Partikelgröße	Strahl-druck [bar]	Reinigungs-intensität	Gleich-mäßigkeit	sichtbare Verletzungen	Kraterrand-veränderungen [%]	zusätz-liche Krater [%]	beschädigte Kornum-gebungen [%]	eliminierte / beschädigte aufstehende [%]	gesamt [%]	Zeit [min]
1	42 b 2	2004	Mikrotrocken	Granatsand	10-60 µm	0,5	+	O	+	negativ		++	Verluste		12
2	42 b 1	2004	Mikrotrocken	Granatsand	10-60 µm	1	+	+	+	negativ		++	Verluste		7
3	39 b 1	2003	Mikrotrocken	Edelkorund 360	21-24 µm	0,5	O	O	+	(+)		(++)			6
4	39 b 2	2003	Mikrotrocken	Edelkorund 360	21-24 µm	1	O	+	+	(+)		(+O)			5
5	39 a 1	2003	Mikrotrocken	Edelkorund 600	8-10 µm	0,5	O	+	+	(+)		(++)			11
6	39 a 2	2003	Mikrotrocken	Edelkorund 600	8-10 µm	1	O	+	+	(+)		(++)			9
7	53 b 1	2005	Mikrotrocken	Edelkorund 600	8-10 µm	0,5	+	O	+	40	5	0	0	23	12
8	53 b 2	2005	Mikrotrocken	Edelkorund 600	8-10 µm	1	+	O	+	56	19	0	33	50	10
9	58 a1a	2005	Mikrotrocken	Edelkorund 1200	2-4 µm	0,5	-	--	+	25	0	0	0	12	()
10	58 a1b	2005	Mikrotrocken	Edelkorund 1200	2-4 µm	1	O	O	+	45	9	0	0	38	35
11	58 a 2	2005	Mikrotrocken	Edelkorund 1200	2-4 µm	1,5	+	+	+	45	9	0	0	38	21
12	38 a 2	2003	Mikrotrocken	Glasperlen 6	90-150 µm	0,5	O	-	--	-		-			15
13	38 a 1	2003	Mikrotrocken	Glasperlen 6	90-150 µm	1	O	-	--	-		-			7
14	38 b 1	2003	Mikrotrocken	Glasperlen 9	10-50 µm	0,5	O	O	-	0		0-			11
15	38 b 2	2003	Mikrotrocken	Glasperlen 9	10-50 µm	1	+	+	-	-		-			4
16	40 a 1	2003	Mikrotrocken	Glasbruch Nr. 54	250-500 µm	0,5	O	-	--	--		-			30
17	40 a 2	2003	Mikrotrocken	Glasbruch Nr. 54	250-500 µm	1	O	--	--	--		--			20
18	40 b 1	2003	Mikrotrocken	Glasbruch Nr. 100	110-210 µm	0,5	+	O	--	--		-			21
19	40 b 2	2003	Mikrotrocken	Glasbruch Nr. 100	110-210 µm	1	O	O	--	--		-			9
20	46 b 1	2004	Mikrotrocken	Hohlgaskugeln S 22	29-53 µm	0,5	-	--	-	negativ		+ O	Verluste		20-30
21	46 b 2	2004	Mikrotrocken	Hohlgaskugeln S 22	29-53 µm	1	+	+	-	negativ		O -	Verluste		20-30
22	46 a 1	2004	Mikrotrocken	Bodenkalk	300-1000 µm	0,5	O	O	-	negativ		+ O	Verluste		30
23	46 a 2	2004	Mikrotrocken	Bodenkalk	300-1000 µm	1	+	O	-	negativ		++	Verluste		30
24	68 b 1	2005	Mikrotrocken	Steinpudermehl	5-300 µm	0,5	O	O	+	86	29	0	0	100	14
25	68 b 2	2005	Mikrotrocken	Steinpudermehl	5-300 µm	1	+	+	+	53	12	0	25	48	9
26	42 a 2	2005	Mikrotrocken	Gaspudermehl mikrofein	40-80 µm	0,5	-	--	+	44	0	0	0	32	24
27	42 a 1	2005	Mikrotrocken	Gaspudermehl mikrofein	40-80 µm	1	O	-	+	63	13	0	0	40	16
28	58 b 1	2006	Mikrotrocken	Gaspudermehl mikrofein	40-80 µm	0,5	+	O	+	72	47	54	70	98	9,5
29	43 b 2	2006	JOS	Granatsand	10-60 µm	0,5	+	O	+	95	76	72	90	107	1,5
30	43 b 1	2006	JOS	Edelkorund 600	8-10 µm	0,5	+	O	+	8	0	0	1	3	5
31	43 a 1	2006	JOS	Steinpudermehl	5-300 µm	0,5	+	+	+	81	40	8	75	95	2
32	43 a 2	2006	JOS	Gaspudermehl mikrofein	40-80 µm	0,5	+	+	O	91	89	91	56	124	3,5
33	57 a 2a	2006	JOS	Weichstrahlmittel S	100-250 µm	1	-	--	O	100	78	17	40	124	(2,5)
34	57 a 2b	2006	JOS	Weichstrahlmittel S	100-250 µm	1,5	-	--	-	100	155	43	67	157	(2)
35	64 a.a	2006	Nebulizzatore - JOS	Wasser / Edelkorund 600	8-10 µm	0,5	O	-	+	29	0	0	5	13	6
36	64 a.b	2006	Wasserbad - JOS	Wasser / Edelkorund 600	8-10 µm	0,5	O	-	+	38	5	0	7	21	(5)
37	65 a 1	2006	Kompresse - JOS	Ethanol / Wasser - Ek 600	8-10 µm	0,5	-	--	+	36	0	0	30	29	7
38	65 a 2	2006	Heißdampf - JOS	Wasser / Edelkorund 600	8-10 µm	0,5	O	-	+	36	0	0	17	23	8
39	55 b 1	2006	Laser	1064 nm, ohne Benetzung	120-160 mJ, Fokus 3		O		+	0	0	0	4	1	1,25
40	55 b 2	2006	Laser	1064 nm, ohne Benetzung	> 230 mJ, Fokus 6		+		+	5	0	0	0	3	1
41	56 b 1	2006	Laser	1064 nm, mit Benetzung	120-160 mJ, Fokus 3		O		+	0	0	0	2	1	1,25
42	56 b 2	2006	Laser	1064 nm, mit Benetzung	> 230 mJ, Fokus 6		+		+	41	0	0	1	12	1
43	58 b 2	2006	Flusssäure	Troplexin / Wasser = 1:3 VT			+		O	39	4	17	0	32	3,5
44	64 b	2006	Flusssäure	3 M.-%-(NH ₄ HF ₂ -Lösung			+		+	52	9	12	3	22	12
45	66 b 1	2006	Flusssäure	1 M.-%-HF-Lösung			+		+	14	0	0	0	7	3,5

Nur wenige Reinigungsverfahren erzielen gleichermaßen gute Ergebnisse hinsichtlich eines ästhetisch zufriedenstellenden Reinigungsergebnisses, geringen Schädigungsgrades und kurzer Reinigungsdauer. Bei geeigneter Parameterwahl überzeugt die Laserstrahlreinigung (Zeile 40) in jeder Beziehung und ist trotz hoher Maschinenkosten aufgrund ihrer Schnelligkeit vielleicht auch in wirtschaftlicher Beziehung das günstigste Verfahren. Alternativen bieten sich bei Einsatz von Edelkorund 600 im feucht-abrasiven JOS-Verfahren bei 0,5 bar (Zeile 31), mit dem es bessere Ergebnisse hinsichtlich Schadensarmut und erforderlicher Strahldauer erzielt als im Mikrotrockenstrahlverfahren (Zeile 7). Hinsichtlich Gleichmäßigkeit des Reinigungsergebnisses und Geschwindigkeit bewirkt Steinpudermehl bei 1 bar im Trockenstrahlverfahren noch bessere Ergebnisse (Zeile 25), allerdings um den Preis eines höheren Schädigungsgrades. Eine weitere Alternative eröffnet sich im Reinigungsverfahren mit stark verdünnter Flusssäure (Zeile 45), das bei sehr geringem Schädigungsgrad und kurzer Reinigungsdauer ein ästhetisch zufriedenstellendes Ergebnis liefert. Allerdings ist hier mit zusätzlichem Zeitaufwand und Kosten aufgrund des notwendigen gründlichen Vorfeuchtens des zu reinigenden Objektes, der Sicherheitsvorkehrungen und des erforderlichen Aufwandes zum Auffangen und fachgerechten Entsorgen der Abwässer zu rechnen.

6.2 Ergebnisse der Reinigungsversuche an originalen Bruchstücken von Amphorenfuß und Amphore

Reinigungsversuche an einem größeren Bruchstück des Fußes von Modellobjekt 1 (Amphore der Neuen Orangerie Potsdam, s. Abb. 73) dienten einer Überprüfung der an den Prüfkörpern des Typs Albanisches Gitter erarbeiteten Untersuchungsergebnisse und der Klärung der Frage, in wie weit diese Ergebnisse auf die Werkgruppe der Amphoren übertragbar sind. Es wurden 11 verschiedene Behandlungen getestet, die ausweislich der Ergebnisse an den Gitterelementen und Vorversuchen an anderen Bruchstücken des Amphorenfußes ein qualitativvolles und wirtschaftlich vernünftiges Reinigungsergebnis erwarten ließen.

Sämtliche Versuchsergebnisse und Bewertungen sind auf der nachfolgenden Seite in einer Tabelle zusammengestellt. Das optische Reinigungsergebnis veranschaulichen die Abb. 89 bis Abb. 92.



Abb. 89: Amphorenfuß, Reinigungsfeld 1 - 3



Abb. 90: Amphorenfuß, Reinigungsfeld 4 - 6



Abb. 91: Amphorenfuß, Reinigungsfeld 7 - 9



Abb. 92: Amphorenfuß, Reinigungsfeld 10 - 12

DBU-Projekt Az 21627-45 Terrakotta

	A	B	C	D	E	F			G	H	I											J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
	Angaben zur Reinigung					Reinigungsergebnis in ästhetischer Hinsicht			Anzahl n ₁ der ausgewerteten Phänomene				Anzahl n ₂ der eindeutig veränderten Phänomene				Prozentuale Veränderungen im Verhältnis zum Zustand vor der Reinigung					Zeit													
	Nr.	Untersuchungsphase	Reinigungsverfahren	Reinigungsmittel	Parameter	Reinigungsintensität	Gleichmäßigkeit	sichtbare Verletzungen	Krater-ränder	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Gesamtzahl	Krater-rand-Veränderungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornumgebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner	Gesamtzahl	Krater-rand-Veränderungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornumgebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner		gesamt												
	[Stück]	[Stück]	[Stück]	[Stück]	[Stück]	[Stück]	[Stück]	[Stück]	[Stück]	[Stück]	[Stück]	[Stück]	[Stück]	[Stück]	[Stück]	[Stück]	[Stück]	[Stück]	[Stück]	[Stück]	[Stück]		[Stück]	[Stück]	[Stück]	[Stück]	[Stück]	[Stück]	[Stück]	[Stück]	[Stück]				
1	AF 1	2006	Mikrotrocken	Glaspulvermehl	0,5 bar	+	+	+	43	29	14	86	1	0	0	1	2	2	0	0	7	2	10												
2	AF 2	2006	Mikrotrocken	Edelkorund 600	1 bar	+	+	+	27	14	25	66	4	0	0	2	6	15	0	0	8	9	11												
3	AF 8	2005	Mikrotrocken	Edelkorund 600	1 bar	+	+	+	12	4	4	20	0	0	1	0	1	0	0	25	0	5	34												
4	AF 10	2005	Mikrotrocken	Steinpulvermehl	1 bar	+	+	+	16	9	3	28	9	2	1	1	13	56	13	11	33	46	15												
5	AF 4	2006	JOS	Glaspulvermehl	0,5 bar	+	+	+	23	22	8	53	2	0	0	0	2	9	0	0	0	4	3												
6	AF 5	2006	JOS	Edelkorund 600	0,5 bar	+	o	+	32	16	17	65	7	0	0	0	7	22	0	0	0	11	6												
7	AF 6	2006	Kompresse JOS	Ethanol : Wasser = 1 : 1 VT Edelkorund 600	0,5 bar	+	o	+	33	14	8	55	27	3	4	5	39	82	9	29	63	71	2,5 + 15												
8	AF 3	2006	Laser	1064 nm, mit Benetzung	120-160 mJ, Fokus 3	+	+	+	29	21	9	59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4												
9	AF 7	2006	Flusssäure	3 M.-%-(NH ₄)HF ₂ -Lösung		+	o	+	25	20	11	56	1	0	0	1	2	4	0	0	9	4	14												
10	AF 11	2006	Flusssäure	1 M.-%-HF-Lösung		+	o	+	22	19	8	49	5	0	0	2	7	23	0	0	25	14	21												
11	AF 12	2006	Flusssäure	Tropolxin 1:3		+	o	+	28	35	14	77	14	2	14	7	37	50	7	40	50	48	9												

Ergebnisse systematischer Reinigungsversuche an Bruchstück 1 des Amphorenfußes (Modellobjekt 1)

Mit allen Verfahren konnte ein visuell gutes oder akzeptables Reinigungsergebnis erzielt werden. Leichte Qualitätsunterschiede sind nur hinsichtlich der Gleichmäßigkeit zu verzeichnen.

Die Laserstrahlreinigung überzeugt durch vollkommene Schonung der Objektoberfläche und vergleichsweise hohen Arbeitsfortschritt. Als Alternative bieten sich Partikelstrahlverfahren an, wobei entgegen den Untersuchungsergebnissen an den Prüfkörpern des Typus Albanisches Gitter und den Vorversuchen von Bernitz an profilierten Bruchstücken des Amphorenfußes⁷³ Glaspudermehl mikrofein von allen Strahlmitteln hinsichtlich Objektschonung und Reinigungstempo, sowohl im Trockenstrahl- als auch im feucht-abrasiven Wirbelstrahlverfahren gleichermaßen am besten abschneidet.⁷⁴ Edelkorund 600 folgt in geringem Abstand, während Steinpudermehl deutlich stärkeren Materialabtrag an der Terrakottaoberfläche hervorruft.

2 von 3 flusssäurehaltigen Zubereitungen weisen sehr geringe bis geringe Schädigungsgrade auf, beanspruchen aber eine relativ hohe Reinigungsdauer. Allerdings ist bei Anwendung einer Flusssäurereinigung an einem Objekt mit einer Vervielfachung der Flächenleistung zu rechnen, da mit annähernd demselben Aufwand größere Bereiche zugleich gereinigt werden können. Das rascher wirkende Fertigpräparat Troplexin verursacht dagegen ähnliche hohe Schädigungsgrade um 50 % wie Mikrotrockenstrahlen mit Steinpudermehl.

Die Kombination einer feucht-abrasiven Partikelstrahlreinigung mit einer Vorbefeuchtung der Auflagen mittels Wasser-Ethanol-Kompresse (Zeile 7) verringert zwar die erforderliche Strahldauer beträchtlich, steigert jedoch den Schädigungsgrad in nicht akzeptablem Maße.

In einer früheren Projektphase 2005 kam Bernitz zu abweichenden Ergebnissen. Neben Edelkorund 600 favorisierte sie v. a. Steinpudermehl (beide bei 1 bar Luftdruck im Mikrotrockenstrahlverfahren). Ihre Bewertung beruht auf der auch mittels Mikroskopie vorgenommenen Auswertung umfangreicher Mikrotrockenstrahlvorproben an weiteren Bruchstücken des Amphorenfußes, allerdings ohne systematischen Vor- und Nachzustandsvergleich anhand von Mikrofotos. Hierbei erhielt Glaspudermehl bei 1 bar Strahldruck makroskopisch wie mikroskopisch ungünstige Bewertungen. Die positive Beurteilung von Steinpudermehl beruhte auch auf einer stärkeren Gewichtung von Verarbeitungsaspekten, insbesondere der Möglichkeit, Intensität und Gleichmäßigkeit der Reinigung gezielt zu steuern, weiche Übergänge zwischen Bereichen unterschiedlicher Verschmutzungsintensität zu erzeugen und einen zügigen Reinigungsfortschritt zu ermöglichen. In diesen Punkten erwies sich das Steinpudermehl als dem Edelkorund 600 deutlich überlegen. Die von Bernitz auf dem Amphorenfuß angelegten Testflächen AF 7 und AF 9 erhielten hinsichtlich des Schädigungsgrades annähernd identische Beurteilungen.⁷⁵ Die vom Autor des vorliegenden Berichtes konstatierten beträchtlichen Unterschiede im Schadensmerkmal veränderte Kraterränder fielen bei Bernitz aufgrund des anderen Bewertungsverfahrens weniger ins Gewicht.

In Vorbereitung der anstehenden Reinigung der Amphore (Modellobjekt 1) und in Absprache mit den fachlich Verantwortlichen von Stiftung Preußische Schlösser und Gärten und Fachhochschule Potsdam wurden von Bernitz weitere Reinigungsversuche auf zwei Amphorenbruchstücken ausschließlich mit Steinpudermehl bei 1 bar Luftdruck und einem Mindestarbeitsabstand von 5 cm vorgenommen. Um zusätzlich den Einfluß unterschiedlicher Bearbeiter zu erfassen, wurde eines der beiden Bruchstücke von Eckehart Böhm gereinigt. Die erzielten Reinigungsergebnisse unterschieden sich nur wenig. Jedoch mußten hinsichtlich des Schädigungsgrades teilweise schlechtere Bewertungen konstatiert werden als bei den vorausgegangenen Reinigungsversuchen.⁷⁶ Neben negativen Veränderungen bei den Merkmalsausprägungen der Schadensindikatoren Kraterränder und aufstehende Körner sind zusätzlich Verluste an Zeichnungsschärfe an weiteren Oberflächendetails wahrzunehmen, für die Bernitz den Begriff Oberflächenrelief als zusätzlicher Bewertungskategorie einführt. Die Verluste wurden als noch akzeptabel eingestuft und Steinpudermehl als Strahlmittel empfohlen unter der Voraussetzung, daß die Parametervorgaben bezüglich Strahldruck (max. 1 bar) und Arbeitsabstand strikt eingehalten werden.

⁷³ Bernitz (2006) Untersuchungsbericht, S. 71 f.

⁷⁴ Allerdings ist auf die unterschiedlichen Strahldrücke hinzuweisen: während Glaspudermehl im Mikrotrockenstrahlverfahren mit 0,5 bar getestet wurde, betrug der Strahldruck bei den ‚Konkurrenten‘ 1,0 bar.

⁷⁵ Bernitz (2006) Untersuchungsbericht, Tabelle 21 auf S. 76

⁷⁶ Bernitz (2006) Untersuchungsbericht, Tabelle 25 auf S. 85

6.3 Diskussion der Reinigungsergebnisse

Die jüngsten Untersuchungen auf den beiden keramischen Substraten Gitterelemente und Amphorenfußbruchstücken haben zu neuen Ergebnissen geführt. Zum Teil werden hierdurch bereits als gesichert geltende Erkenntnisse früherer Projektphasen in Frage stellen:

- Demnach sind Reinigungen mittels Laserstrahl bei Auswahl geeigneter Parameter den Reinigungen mittels Mikrotrockenstrahl oder JOS-Verfahren nicht nur in ästhetischer Hinsicht ebenbürtig und bezüglich Objektschonung überlegen. Auch die Flächenleistung ist deutlich höher als bei Mikrotrockenstrahlreinigungen.
- Mit Flusssäure-haltigen Reinigungslösungen sind zufriedenstellende oder gute Reinigungsergebnisse bei geringen Veränderungen der Oberflächenstruktur möglich. Allerdings ergaben die Versuche auf den beiden unterschiedlichen keramischen Untergründen widersprüchliche Ergebnisse bezüglich des geringeren Schadenspotentials der beiden Favoriten reine Flusssäure und Ammoniumhydrogenfluorid.
- Mit dem feucht-abrasiven Rotationsstrahlverfahren JOS können wesentlich schneller befriedigende Reinigungsergebnisse als mit dem Mikrotrockenstrahlverfahren erzielt werden, ohne daß dies bei Verwendung von Edelkorund 600 zu stärkeren Schäden führte. Andere Strahlmittel wie Granatsand, Steinpudermehl und Glaspudermehl microfein verursachten hingegen bei Anwendung im JOS-Verfahren z.T. deutliche Veränderungen an den Oberflächen des Prüfkörpertypus Gitterelemente. Noch am besten schnitt hierbei Steinpudermehl ab.
- Für das Mikrotrockenstrahlverfahren erbrachte die Ausweitung der systematischen Reinigungsversuche am Bruchstück 1 des Amphorenfußes und die Auswertung mit dem dualen Bewertungssystem neben der Bestätigung von Edelkorund als sehr schonendem Strahlmittel ebenfalls sehr gute Resultate für Glaspudermehl microfein, hingegen eine ungünstigere Bewertung des Steinpudermehls.

Hinsichtlich des Schädigungspotentials der in die engere Wahl zu ziehenden Strahlmittel liegen damit z.T. widersprüchliche Aussagen vor, die auf der Grundlage des vorliegenden Auswertungen nicht aufgelöst werden können.

Die aufgezeigten Widersprüche und z.T. differierende Ergebnisse bei gelegentlichen Versuchswiederholungen geben Anlaß, nochmals die Verlässlichkeit der Untersuchungsergebnisse zu prüfen:

Folgende Zufallsfaktoren können die Resultate der Reinigungsversuche mitgeprägt haben:

- Unterschiede in Struktur und mechanischer Empfindlichkeit der keramischen Oberflächen und in der Auswahl der mittels Mikrofotos dokumentierten Merkmale
- wechselnde Eigenschaften der zu entfernenden Auflagerungen in Dicke, Gleichmäßigkeit, Härte; insbesondere bei dickeren Auflagerungen ist die Unterscheidung reinigungsbedingter Oberflächenverletzungen von Veränderungen durch Schmutzabtrag ohne Substanzverlust an der Terrakotta teilweise unsicher
- wechselnde Geschicklichkeit der verschiedenen Personen, die die Reinigung der Testflächen in den unterschiedlichen Projektphasen durchführt haben.

Eine sichere Einschätzung des tatsächlichen Einflusses der genannten Zufallsfaktoren ist ohne weitere Untersuchungen nicht möglich.

Die Auswertung und Bewertung der Versuche unterliegt folgenden Einschränkungen:

- Das Bewertungsschema wurde mehrfach weiterentwickelt, wobei für eine Adaption der Ergebnisse vorhergehender Projektphasen mittels Neubewertung die erforderlichen Voraussetzungen nicht oder nur eingeschränkt gegeben waren. Zu nennen ist in diesem Zusammenhang die deutlich geringere Anzahl mikrofotografisch dokumentierter Oberflächenphänomene im Vor- und Nachzustand aus der Projektphase 2005.
- Trotz umfänglicher Bemühungen, die Bewertungsmaßstäbe eindeutig zu definieren, verbleiben Ermessensspielräume.
- Eine Evaluierung des jüngsten, dual strukturierten Systems zur Quantifizierung reinigungsbedingter Schäden wurde bisher nicht durchgeführt.
- Die begrenzte, z.T. geringe Bildqualität der Mikrofotos, insbesondere aus den früheren Projektphasen, führt zu Unsicherheiten bei der Unterscheidung reinigungsbedingter Oberflächenverletzungen von Veränderungen, die ohne Substanzverlust am Scherben allein durch den Schmutzabtrag hervorgerufen werden.

Aufgrund der genannten Einschränkungen sind eine Reihe weiterführende Schritte zur Überprüfung, Klärung und Absicherung der bisherigen Untersuchungsergebnisse wünschenswert:

- Mehrfache Wiederholung ausgewählter Reinigungsversuche zur Bewertung von Zufallseinflüssen

- Wiederholung ausgewählter Reinigungsversuche aus älteren Projektphasen, um die Voraussetzungen für eine systematische Schadensbewertung anhand von Vorher-Nacher-Mikrofotos zu schaffen
- Erneute Bewertung der gleichen Mikrofotografien in repräsentativem Umfang durch weitere Personen; hierdurch soll die Ergebniszuverlässigkeit des jüngsten Bewertungssystems überprüft werden
- Evaluierung der Aussagekraft des jüngsten Bewertungsschemas durch stichprobenartige Auswertung von Reinigungsversuchen aus 2006 nach der Methode von Bernitz

Hinsichtlich der Partikelstrahlverfahren, die im Mittelpunkt der Untersuchungen standen, interessiert auch die Frage, welchen Einfluss bestimmte Eigenschaften von Strahlgütern auf optisches Reinigungsergebnis, Schädigungsgrad und benötigte Reinigungsdauer haben. Als relevante Partikeleigenschaften kommen v. a. Korngröße, Kornform, Härte und Dichte in Frage.

Ein größeres Schädigungspotential harter Strahlgüter gegenüber weniger harten oder weichen Sorten, wie es Ettl aus rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen gereinigten Natursteins ableitete⁷⁷, wird durch die Untersuchungsergebnisse an Terrakotta bei den relativ geringen Vergrößerungen des verwendeten Stereomikroskops nicht bestätigt. Hier werden im Gegenteil mit den härtesten Strahlgütern (Edelkorund) die besten und mit den weichsten (Weichstrahlmittel S) die schlechtesten Ergebnisse erzielt.

Auffällig ist, dass die schlechtesten Ergebnisse mit den größten Strahlmitteln erzielt wurden (Korngrößen von 90 bis 500 µm), während feinere und sehr feine Strahlmittel gute bis sehr gute Reinigungseffekte bei geringer Schädigungswirkung zeigten. Dies erscheint unmittelbar einleuchtend, wenn man die wesentlich bessere geometrische Anpassung geringer Korngrößen an das Relief der Oberflächen bedenkt. Offenbar ist aber bei Edelkorund 600 mit 8-10 µm Partikelgröße eine Grenze erreicht, deren Unterschreitung mit Edelkorund 1200 (2-4 µm) zu deutlichen Effektivitätsminderungen in Reinigungswirkung und Flächenleistung führen.

Eine detailliertere Analyse von Einflußfaktoren ist aus dem vorliegenden, relativ heterogenen Ergebnisdaten nicht zu gewinnen. Da die Reinigungsergebnisse stets durch das komplexe Zusammenwirken mehrerer Einflußgrößen bedingt sind, wäre ein spezieller, ausgeklügelter Versuchsaufbau erforderlich, um den Einfluß von Einzelfaktoren näher zu bestimmen. Dies war nicht Gegenstand des praxisorientierten Projektes.

Mit chemischen Mitteln zur Gipsmobilisierung wurden nur geringe, meist jedoch keinerlei Reinigungserfolge erzielt, was in der silikatischen Bindung der Auflagerung und dem Fehlen relevanter Gipsgehalte begründet liegt. Auf eine ausführlichere Ergebnisdarstellung wurde daher verzichtet. Aus diesen Resultaten läßt sich jedoch eine begrenzte Eignung von Reinigungsmitteln wie Anionenaustauscherharzen, Ammoniumcarbonat oder EDTA als orientierende Testreagenzien zur Feststellung relevanter Gipsanteile in den zu entfernenden Auflagerungen ableiten, da bei hohen Gipsgehalten ein deutlich ablesbare Reinigungswirkung eintreten müßte. Allerdings können und sollten solche Tests die bekannten mikrochemischen, mikroskopischen und instrumentell-analytischen Nachweismethoden für Gips nicht ersetzen.

7 Reinigung von Terrakottaoberflächen, Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Wichtigstes Ziel des Projektes war es, die Eignung verschiedene Reinigungsverfahren zur Entfernung umweltbedingter Ablagerungen auf Terrakotta vergleichend zu untersuchen und ein System für eine nachprüfbar, möglichst objektive Bewertung von Reinigungstests zu schaffen. Den Ausgangspunkt bildete die restauratorische und materialkundliche Untersuchung einiger keramischer Ziergefäße und ihrer Schmutzauflagerungen aus dem Besitz der Stiftung Preußische Schlösser und Gärten. Es handelt sich vor allem um großformatige Amphoren, die von der Berliner Manufaktur March serienmäßig produziert wurden und 1860 auf der Attika des Mittelrisalits der Neuen Orangerie Potsdam aufgestellt wurden. Der cremefarbene Scherben dieser bei Temperaturen um 1200 °C gebrannten Amphoren weist eine homogene Textur ohne Engobierung und eine hohe Festigkeit auf. Infolge herstellungsbedingter Gefügeverdichtung ist die Oberfläche trotz einer Porosität von ca. 10 Vol.-% praktisch wasser- und dampfdicht. Die dunklen, meist filmartigen Auflagerungen sind silikatisch gebunden und enthalten – entgegen den Erwartungen – ebenso wenig Gips wie das oberflächennahe Gefüge. Eine unabweisba-

⁷⁷ Ettl u.a. (1998) Schwarze Krusten, S. 120

re konservatorische Notwendigkeit für eine Reinigung ließ sich nicht feststellen, obwohl das in der Steinwerkstatt der FHP untersuchte Exemplar zu den am stärksten verschmutzten Stücken zählte. Weder waren Schäden an der Oberfläche zu erkennen, die zwingend auf die Ablagerungen zurückzuführen waren, noch verbesserte sich die Durchlässigkeit für Gase und Flüssigkeiten nach einer Entfernung der Auflagerungen. Die Reinigung diente damit vornehmlich der Wiederherstellung des ursprünglichen Erscheinungsbildes.

Im Mittelpunkt der Untersuchungen standen das trocken-abrasive Mikrotrockenstrahlverfahren und das feucht abrasive Rotationsstrahlverfahren JOS unter Einsatz der Piccolodüse. Als Strahlmittel kamen Edelkorund, Glasbruch und Glaskugeln in verschiedenen Korngrößen, ferner Granatsand, Bodenkalk, Steinpudermehl, Hohlglaskugeln sowie ein Weichstrahlmittel zum Einsatz. Die Strahlrücke betragen meist 0,5 und 1 bar. Zusätzlich wurde der Effekt verschiedener Vorbefeuchtungsvarianten bei nachfolgender Partikelstrahlreinigung mit dem JOS-Verfahren getestet und Reinigungsversuche mit Laserstrahlung und mit Flusssäure-haltigen Reinigungslösungen vorgenommen. Die Versuche wurden zunächst auf Elementen eines Albanischen Gitters durchgeführt. Die Eigenschaften des keramischen Scherbens und der Auflagerungen dieser Prüfkörper wiesen Ähnlichkeiten, aber auch Unterschiede zu den Amphoren der Neuen Orangerie auf. Nachfolgend wurden mit ausgewählten Verfahren Testflächen auf Bruchstücken eines zur Amphore gehörigen Fußteils und der Amphore selbst angelegt.

Die ästhetische Wirkung der verschiedenen Reinigungsverfahren wurde mit bloßem Auge im Vergleich der Testflächen untereinander festgestellt. Messungen von kapillarer Wasseraufnahme und Luftpermeabilität zum Nachweis der physikalischen Reinigungswirkung erwiesen sich als nicht aussagekräftig, da keine Veränderungen an den dichten keramischen Oberflächen nachgewiesen werden konnten. Zur Feststellung reinigungsbedingter Schäden wurden die Musterflächen auflichtmikroskopisch untersucht. Zunächst wurden die Phänomene der keramischen Oberflächen katalogisiert und in drei Kategorien mechanisch empfindlicher Merkmale als mikroskopische Schadensindikatoren definiert. Es zeigte sich, dass das Ausmaß mechanischer Schäden an der Oberfläche mittels auflichtmikroskopischer Untersuchungen der gereinigten Flächen nur unzureichend festzustellen ist. Lediglich relativ grobe Beschädigungen ließen sich auf diese Weise sicher erkennen. Erst die fotografische Dokumentation ausschnittgleicher mikroskopischer Befunde vor und nach einer Reinigung ermöglichte eine zuverlässige und differenzierte Beurteilung des Schädigungsgrades.

Besonderes Augenmerk lag auf der Nachprüfbarkeit der vorzunehmenden Bewertungen und einer möglichst weitgehenden Einschränkung der Beurteilungssubjektivität. Hierzu wurden für die Kriterien zur Bewertung der ästhetischen Reinigungswirkung mit bloßem Auge (Reinigungsintensität, Gleichmäßigkeit und Verletzungen der Oberfläche) und des Schädigungsgrades im mikroskopischen Maßstab (Kraterränder, Quarzkornumgebungen, aufstehende Körner) Bewertungsstufen und Bewertungsmaßstäbe definiert. Während der Projektlaufzeit wurde insbesondere das Bewertungssystem der mikroskopischen Schadensindikatoren mehrfach weiterentwickelt. Damit stehen am Projektende zwei Bewertungsalternativen zur Verfügung: Das erste System beruht auf einer fein abgestuften qualitativen Bewertung mikroskopisch nachweisbarer Oberflächenveränderungen anhand von jeweils ca. 8 mikroskopischen Bildpaaren. Das zweite System gruppiert sämtliche Oberflächenphänomene einer größeren Anzahl von ca. 20 Mikrofotopaaren in die beiden Kategorien „eindeutig verändert“ oder „nicht verändert oder nicht eindeutig verändert“, ohne die Qualität der beobachteten Veränderungen weiter zu differenzieren. Die Auswertung erfolgt rein statistisch und wird als Prozentsatz der Veränderungen gegenüber dem ungereinigten Zustand ausgewiesen. Da eine Neubewertung sämtlicher Untersuchungsergebnisse vorausgegangener Projektphasen nach Bewertungssystem 2 bei gegebener Datengrundlage teils nur in geringerem Umfang, teils gar nicht möglich war, sind die konkreten Ergebnisse der Reinigungsversuche aus unterschiedlichen Projektphasen zum Teil nicht uneingeschränkt vergleichbar.

Unter Berücksichtigung dieser methodischen Einschränkung können die Ergebnisse folgendermaßen zusammengefaßt werden: Einige Strahlmittel bewirken bei schlechter Reinigungswirkung eklatante Beschädigungen der keramischen Oberflächen trotz der geringen Strahlrücke (Glasbruch 54, Glasperlen 6, Weichstrahlmittel S). Weitere Strahlmittel verursachen bei guter oder ausreichender Reinigungswirkung nicht akzeptable Schäden, die sich bereits bei einfacher mikroskopischer Betrachtung feststellen lassen (Glasperlen 9, Glasbruch 100). Das Schädigungspotential weiterer Strahlgüter wird dagegen erst durch den Vergleich von Mikrofotos von Vor- und Nachzustand offenbar. Zu dieser Gruppe gehören Bodenkalk, Hohlglaskugeln S 22 und Granatsand. Mit Edelkorund 1200 können bei Strahlrücken von 1 und 1,5 bar gute bis akzeptable Reinigungsergebnisse bei vergleichsweise sehr geringem Schädigungsgrad erzielt werden, jedoch ist die benötigte Reinigungsdauer wirtschaftlich nicht tragbar. Mit Edelkorund 600 können auf beiden Substraten mit trocken- wie feucht-abrasivem

Strahlverfahren bei akzeptablem Zeitaufwand durchweg positive Ergebnisse hinsichtlich Reinigungswirkung und Schadensarmut erzielt werden. Bei gleichermaßen gutem ästhetischen Reinigungsergebnis ergeben sich für Steinpudermehl und Glaspudermehl hinsichtlich des Schädigungspotentials widersprüchliche Beurteilungen. In der Projektphase 2005 wurde Steinpudermehl zwar eine etwas höhere Schädigungsgrad als Edelfkorund 600 attestiert, der aber deutlich geringer als von Glaspudermehl eingestuft wurde. Steinpudermehl wurde daraufhin, auch aufgrund der guten Steuerbarkeit von Intensität und Gleichmäßigkeit des Reinigungsergebnisses, als Trockenstrahlmittel empfohlen und bereits an mehreren Amphoren praktisch eingesetzt. Dagegen ergaben Reinigungsversuche des Jahres 2006 auf Bruchstücken des Amphorenfußes für Glaspudermehl eine bessere Bewertung als für Steinpudermehl, z.T. sogar besser als für Edelfkorund 600. Aufgrund des heterogenen Bewertungsgrundlagen sind weitere Reinigungsversuche zur Abklärung erforderlich.

Bei Einsatz des feucht-abrasiven Rotationsstrahlverfahren JOS verkürzt sich die Reinigungsdauer im Vergleich zur trocken-abrasiven Mikrostrahlreinigung bei gleichem Strahlmittel und gleichem Strahl- druck deutlich. Hinsichtlich der Frage, welches der beiden Verfahren größere Schäden hervorruft, kann aus der Vielzahl der Versuche kein eindeutiges Ergebnis abgeleitet werden. Eine Befeuchtung der zu entfernenden Auflagerungen vor einer Partikelstrahlreinigung führt auf beiden Substraten zu einem Anstieg des Schädigungsgrades. Überdies war der Reinigungseffekt häufig schlechter.

Die Reinigung mittels Laserstrahl erweist sich bei Benetzung der Oberfläche und geringer Energiedichte als die schonenste und auch schnellste Reinigungsmethode bei gutem ästhetischen Reini- gungsergebnis. Mit gering konzentrierten Lösungen von Fluorwasserstoffsäure und Ammoniumhy- drogenfluorid können ebenfalls gute Reinigungsergebnisse bei niedrigen Schädigungsgraden und geringer bis akzeptabler Reinigungsdauer erzielt werden.

Die jüngsten Projektergebnisse geben Anlaß, die früher gegebene Empfehlung von Steinpudermehl im Mikrotrockenstrahlverfahren zur Reinigung der Amphoren der neuen Orangerie Potsdam noch einmal zu überdenken. Nach Auffassung des Autors sollten sowohl eine Laserstrahlreinigung als auch eine Anwendung des JOS-Verfahrens erwogen werden. Als weiteres Strahlgut sollte Glaspu- dermehl microfein in Betracht gezogen werden. Eine Anwendungsempfehlung Flusssäure-haltiger Lösungen erscheint zum jetzigen Zeitpunkt verfrüht, da die bisherigen positiven Ergebnisse das mög- liche Schädigungspotential noch nicht hinreichend ausgelotet haben. Selbstverständlich hätte einer endgültigen Entscheidung das Anlegen und Überprüfen entsprechender Musterflächen an einer Amphore vorauszugehen.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, daß beide Partikelstrahlverfahren und alle Strahlgüter durch mechanische Beanspruchung der Oberflächen unerwünschte Veränderungen, Schäden hervorrufen, wenn gleich sich diese in Ausmaß und Intensität stark unterscheiden. Auch Reinigungen mit Fluss- säure-haltigen Lösungen verursachen sichtbare Veränderungen der keramischen Oberflächen. Nur das Laserstrahlverfahren ermöglicht bei gut angepaßten Parametern eine schädigungsfreie Reini- gung. Da eine breitere Anwendung dieses Verfahrens aus Kostengründen häufiger nicht in Frage kommt, ist es um so wichtiger, Kombinationen anderer Reinigungsverfahren, Reinigungsmittel und Verfahrensparametern auszuwählen, die unerwünschte Veränderungen der Objektoberfläche nur im geringsten Ausmaß hervorrufen.

Neben dem Kriterium der geringst möglichen Oberflächenschädigung sind bei der Auswahl von Rei- nungsverfahren stets weitere Anforderungen zu berücksichtigen, die sich größtenteils aus der Ziel- setzung der Reinigungsmaßnahme ergeben. Die ästhetische Erscheinung soll verbessert bzw. das ursprüngliche, durch Auflagerungen entstellte Erscheinungsbild wieder gewonnen werden, die Aufla- gerungen müssen entfernt werden, weil sie schädlich für das Objekt sind und/oder weil sie notwendi- ge konservierende Eingriffe verhindern. Die Reinigung soll bei meist begrenzten Mitteln möglichst schnell erfolgen und weder die mit der Durchführung beauftragten Personen noch die Umwelt schädi- gen. Diese Anforderungen sind für jedes Objekt neu zu definieren und gegeneinander abzuwägen. Auch die Gewichtung der in diesem Projekt erarbeiteten Beurteilungskriterien zur Auswahl eines Rei- nigungsverfahrens ist daher objektspezifisch vorzunehmen und kann nicht nach einem unverrückba- ren Schema erfolgen. Nach Auffassung des Autors sollten bei der Auswahl von Reinigungsalternati- ven auf der Grundlage von Reinigungsversuchen im Labormaßstab der Beurteilung des Schädi- gungsgrades jedoch ein höheres Gewicht als der Bewertung ästhetischer Kategorien eingeräumt werden, zumal die Reinigungswirkung auf großen Flächen anhand kleiner Musterflächen nur unzurei- chend eingeschätzt werden kann.

Die Beantwortung der Frage, welches Schadensausmaß in Abwägung verschiedener, oft konkurrie- render Ansprüche an eine Reinigung noch zu tolerieren sind, hängt ganz entscheidend auch davon

ab, wie Reinigungstestflächen untersucht werden. Bei Betrachtung mit bloßem Auge oder Lupen können nur schwerste Beschädigungen aufgelöst werden. Neben der stereoskopischen Betrachtung eröffnet insbesondere die mikrofotografische Dokumentation deckungsgleicher Objektausschnitte vor und nach einer Probereinigung neue Dimensionen. Es ist zu wünschen, dass die in diesem Projekt entwickelte Untersuchungs- und Bewertungsmethode breitere Anwendung findet, nicht nur bei Laboruntersuchungen. In welchem Maße sich diese Methode im Restaurierungsalltag zur objektspezifischen Auswahl des am besten geeigneten Reinigungsverfahrens und zur Qualitätskontrolle von Reinigungsmaßnahmen anwenden lassen wird, ist v. a. abhängig von dem hiermit verbundenen Aufwand und den Möglichkeiten, das Verfahren auch vor Ort anzuwenden. Hier besteht weiterer Entwicklungsbedarf, wobei erste Lösungsansätze im Rahmen des Projektes bereits thematisiert wurden (s. folgendes Kapitel).

8. Ausblick zur Reinigungsproblematik

8.1 Zur Übertragbarkeit der Projektergebnisse auf die Reinigungsproblematik anderer Objekte aus Terrakotta oder verwandten Materialien

Materialität und Zustand der zu reinigenden Oberflächen und abzutragenden Auflagerungen sowie deren Haftung untereinander unterscheiden sich von Objekt zu Objekt. Damit hängen die durch eine Reinigungsmaßnahme erzielte Reinigungswirkung und das Ausmaß der hierbei verursachten Objektschädigung nicht allein von den gewählten Reinigungsmethoden bzw. Reinigungsmitteln und bestimmten Verfahrensparametern ab. Die Wechselwirkungen sind komplex und nicht vorhersehbar. Daher darf sich die Auswahl von Reinigungsverfahren für ein bestimmtes Objekt nicht ausschließlich auf frühere Erkenntnisse und Erfahrungen stützen. Die im Rahmen des Projektes erarbeiteten Bewertungen einzelner Reinigungsmethoden, Reinigungsmittel und diesbezüglicher Parameter sind nicht ungeprüft auf andere Objekte übertragbar. Grundlegend ist stets die restauratorische und materialkundliche Untersuchung des zu reinigenden Objektes und seiner Auflagerungen. Sie bildet die unverzichtbare Basis einer zielgerichteten Vorauswahl von Reinigungsmethoden, wobei die Ergebnisse des Terrakottareinigungsprojektes oder anderer Studien Anhaltspunkte für die Selektion erfolgsversprechender Verfahren bietet. Deren tatsächliche Eignung für ein bestimmtes Objekt kann jedoch nur anhand von Reinigungsversuchen am Objekt selbst festgestellt werden.

8.2 Zur Übertragbarkeit der Untersuchungs- und Bewertungsmethode auf andere Materialien

Bei der Strukturierung und Auswertung objektspezifischer Reinigungsversuche kann das im Projekt erarbeitete Methodenset aus Beobachtung der Reinigungswirkung mit bloßem Auge, auflichtmikroskopischer Untersuchung, ausschnittidentischer fotografischer Dokumentation mikroskopischer Befunde vor und nach einer Reinigung und den Schemata zur Auswertung und Bewertung hilfreich sein. Die Anwendung dieses Instrumentariums setzt eine Anpassung an die spezifischen Eigenheiten des Objektes und die Zielrichtung der Reinigungsmaßnahme voraus. Hierzu sind objektspezifisch mechanisch sensible und mikroskopisch gut zu erkennende Oberflächenphänomene zu identifizieren und zu klassieren. Hierauf müssen Bewertungsstufen und Bewertungsmaßstäbe abgestimmt werden. Handelt es sich um kapillarporöse Objekte, erscheint die Ergänzung um Messungen von Wasseraufnahme und – im Falle einer erforderlichen Konsolidierung – auch Lösemittelaufnahme, ggf. auch der Luftpermeabilität vor und nach der Reinigung sinnvoll.

Wenn die zu entfernenden Auflagerungen so dick sind, daß die Gestalt der Objekt Oberfläche nicht mehr oder nicht hinreichend deutlich zu erkennen ist, dürfte die Methode des Mikrofotovergleichs nicht mehr anzuwenden sein. Die Anlage mehrerer Musterflächen je zu evaluierendem Reinigungsverfahren in Bereichen mit dichten Krustenauflagerungen und in solchen ohne oder mit nur sehr dünnen Auflagerungen könnte hier sinnvoll sein: Erstere können bevorzugt zur Beurteilung der Reinigungswirkung mit bloßem Auge herangezogen werden, zweitere zur mikroskopisch-fotografischen Untersuchung des Schädigungsgrades. In jedem Fall wird es erforderlich sein, sich mit der Methode und ihrer technischen Umsetzung vertraut zu machen. Besonderes Augenmerk ist auf eine reproduzierbare Streiflichtbeleuchtung bei der mikrofotografischen Dokumentation zu legen, da sonst Veränderungen gar nicht oder nicht zuverlässig erkannt werden können. Anhand von Vortests sollte geprüft werden, inwieweit sich die zur Beurteilung vorgesehenen Oberflächenphänomene hierfür tatsächlich eignen.

8.3 Technische Alternativen zur Fotografie mittels Stereomikroskop

Das verwendete Stereomikroskop Askania GSZ 2T mit Fototubus ist vornehmlich für die direkte stereomikroskopische Betrachtung ausgelegt, weniger für die fotografische Dokumentation mikroskopischer Befunde. Daher ist die erreichbare Bildqualität begrenzt. Die Möglichkeit, das Mikroskop am Objekt, zumal am Bauwerk einzusetzen, sind äußerst beschränkt. Aus diesen Gründen wurde nach Alternativen zu diesem Arbeitsinstrument gesucht.

8.3.1 Nahaufnahmen mit Fotokameras und sogenannten Makroobjektiven

Bernitz versuchte, Fotos geeigneter Qualität und Vergrößerung mit einer Spiegelreflexkamera und Makroobjektiv zu erzielen.⁷⁸ Analoge Fotos wurden nachfolgend bei 4000 dpi gescannt und die gewünschten Ausschnitte am Bildschirm betrachtet. Digitalaufnahmen wurden mit höchstmöglicher Auflösung erstellt, was ebenfalls die Betrachtung von Ausschnitten ermöglichte. Als problematisch erwies sich die geringe Schärfentiefe und das korrekte Fokussieren mittels Kamerasucher, was eine sofortige Nachkontrolle der Aufnahmen am Bildschirm notwendig machte. Die erzielbaren Abbildungsmaßstäbe waren deutlich geringer als mit dem Stereomikroskop. Das Erstellen der Aufnahmen am Objekt erwies sich als äußerst langwierig.

Mit einer digitalen Kompaktkamera mit gutem Nahbereich können formatfüllende Bildausschnitte von ca. 1,5 * 2 cm erzielt werden.⁷⁹ Bei maximaler Auflösung und Qualität (Tiff) ergibt sich eine Bildinformation von 4 Millionen Pixeln. Für einen Bildausschnitt von 2,6 * 3,9 mm, wie ihn das digitale Bild am Stereomikroskop aufwies, verbleibt nur ein Dreißigstel der Bildinformation (133 kB). Diese Informationsdichte stellt gegenüber der Mikrofotografie am Stereomikroskop eine Verschlechterung dar.

8.3.2 Fotomakroskopie

Wesentlich größere Abbildungsmaßstäbe bis 25 : 1 können mittels Balgengerät und einfachen oder speziellen Objektiven erzielt werden (Normalobjektiv, Makroobjektiv, Lupenobjektiv, Vergrößerungsobjektiv). Für eine ausreichende Beleuchtung und korrekte Belichtung sind Blitzgeräte und Kamera mit TTL-Steuerung sinnvoll, ferner ein Stativ, Einstellschlitten und Drahtauslöser unabdingbar. Das Scharfstellen erfolgt über die Abstandsregulierung der gesamten fotografischen Einheit zum Objekt mittels Einstellschlitten. Hauptproblem ist die Realisierung eines reproduzierbaren Streiflichtes mittels Blitz. Ein teilweise abgeklebter Ringblitz bietet sich evtl. als einfache Lösung an. Mit dieser Ausrüstung kann auch am Bauwerk oder an größeren Objekten fotografiert werden. Mit einem Repräsentanten o.ä. läßt sich alternativ ein digitales Fotomakroskops als Tischmodell realisieren. Dabei wird eine Kompaktkamera mittels Zwischentubus mit einem Balgengerät und einem Vergrößerungsobjektiv verbunden. Bei Nutzung einer TV-Karte kann die Scharfeinstellung direkt am PC-Bildschirm vorgenommen werden.⁸⁰ Problematisch ist die geringe Schärfentiefe, die bei nicht planen Objektflächen, aber auch bei schiefer Ausrichtung der Kamera zu unbefriedigenden Ergebnissen führt. Zur Erweiterung des begrenzten Schärfentiefebereichs können Mehrfachaufnahmen in verschiedenen Schärfenebenen gefertigt werden und mittels kostenloser Software zu einem scharfen Bild zusammengefügt werden.⁸¹

8.3.3 Digitale (Video)Mikroskopie

Der Geräteaufbau besteht aus einer zylinderförmigen Zoomoptik mit integrierter Beleuchtung und CCD-Sensor, einem Steuergerät mit Beleuchtungseinheit und einem Bildschirm. Der Mikroskoptubus kann in eine Halterung eingebaut als Tischgerät verwendet werden, in freier Handführung oder aber mit einem Abstandhalter versehen direkt auf das Objekt oberfläche aufgesetzt werden. Es stehen eine Reihe von Objektiven mit verschiedenen Vergrößerungsbereichen sowie Aufsatzlinsen zu deren Erweiterung und weiteres Zubehör, etwa zur Realisierung von Streiflicht zur Verfügung. Das mikroskopische Bild wird online am Bildschirm betrachtet, was eine maximale Kontrolle des gewählten Ausschnittes, der gewünschten Vergrößerung, der Beleuchtung etc. ermöglicht. Bei entsprechender Softwareausstattung kann die ohnehin beträchtliche Schärfentiefe durch Mehrfachaufnahmen in ver-

⁷⁸ Bernitz (2006) Untersuchungsbericht, S. 94-99; Fuji FinePix S2 Pro mit AF Micro Nikkor 60 mm

⁷⁹ Nikon Coolpix 4500

⁸⁰ <http://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/SammlerSteckbriefe/der%20Sauerl%E4nder/EquipmentFotografie>

⁸¹ <http://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Digitale%20Mehrebenen-Fotografie?redirectfrom=Digitale+Mehrebenenfotografie>

schiedenen Fokussierebenen und der digitalen Zusammenfügung der jeweils schärfsten Bildbereiche beträchtlich erweitert werden.

Neben den genannten Eigenschaften liegen die Vorteile der digitalen Videomikroskopie in der hohen Bildqualität, der universellen Einsetzbarkeit an beliebig geformten plastischen Objekten und der Einsatzmöglichkeit am Bauwerk (Stromanschluß vorausgesetzt). Die Anschaffungskosten liegen im fünfstelligen Bereich.

9 Modellhafte Restaurierungsmaßnahmen⁸²

9.1 Vorbemerkungen

Im Rahmen des Forschungsprojektes zu den Terrakotten der Neuen Orangerie im Park Sanssouci wurden Proberestaurierungen an ausgewählten Terrakottaobjekten aus dem Bestand der Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg durchgeführt. Ziel der Arbeiten war es, die an der FH Potsdam in naturwissenschaftlichen Untersuchungen und Testreihen entwickelten Restaurierungsansätze in der praktischen Restaurierung umzusetzen und zu erproben. Restauriert wurden insgesamt zwölf Objekte aus Terrakotta, davon acht Amphorenvasen vom Dach des Orangerieschlusses, eine Pflanzschale von der Villa Illaire, sowie drei Terrakottareliefs von den Römischen Bädern. Alle Objekte wurden abgebaut bzw. aus dem Depot der Abteilung Skulpturenrestaurierung abtransportiert und zur Restaurierung in die Werkstatt auf dem Skulpturenhof am Neuen Palais verbracht.

Aus den unterschiedlichen Objektsituationen ergaben sich folgende Restaurierungsschwerpunkte:

- Reinigung der Terrakottaoberflächen
- Herstellen plastischer Ergänzungen (Abgüsse)
- Verklebung loser Teile und Bruchstücke
- Schließen von Rissen und Fehlstellen
- Sichere Wiederaufstellung der Vasen auf der Balustrade der Orangerie
- Reduktion der Gipsanreicherungen im oberflächennahen Porenraum der Terrakottareliefs
- Vorbeugende Maßnahmen zum Schutz gegen Durchfeuchtung und erneute Versalzung

Für Reinigung, Klebung und Ergänzung wurden die von den Projektpartnern entwickelten und laborerprobten Restaurierungskonzepte angewandt. Besondere Technologien für das Wiederversetzen, die Entsalzung und die flankierenden Schutzmaßnahmen wurden darüber hinaus gemeinsam mit den Projektpartnern und den zuständigen Restauratoren der Stiftung entwickelt werden.



Abb. 93: Demontage der Amphoren



Abb. 94: Erste Probereinigung vor-Ort

⁸² Zimmermann, Böhm (2006) Restaurierungsbericht

9.2 Zerlegung und Reinigung

Alle Vasen wurden zunächst in Vasenkörper, Vasenfuß und Deckel zerlegt. Hierzu wurde die schadhafte Vermörtelung von Vasenkörper und -fuß gelöst und vorsichtig durch Fräsen, Bohren sowie dem Einsatz druckluftbetriebener Werkzeuge entfernt.

Als Reinigungsmethode kam mit dem Mikrofeinstrahlverfahren das nach umfangreichen Voruntersuchungen und Testreihen von der FH Potsdam empfohlene Verfahren zum Einsatz. Mit dem entsprechenden Strahlmittel und sonstigen technischen Parametern ist es eine wirksame und zugleich schonende Methode zur Beseitigung der Schadstoffanreicherungen auf der Terrakottaoberfläche. Zur besseren Abstimmung der Reinigungsparameter und des zu erzielenden Reinigungsgrades erfolgte die Bearbeitung der ersten Vase in den Werkstätten der FH Potsdam.



Abb. 95: Ziegelstein als Versatzhilfe



Abb. 96: Ungereinigter Vorzustand



Abb. 97: Zustand nach Reinigung

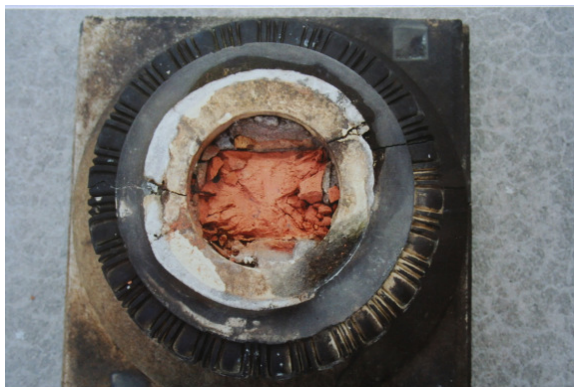


Abb. 98: Sockel vor mechanischer Reinigung



Abb. 99: Sockel nach mechanischer Reinigung

Als Strahlmittel wurde ein Dolomitmehl (Handelsname Steinpudermehl) der Firma Weißenburger eingesetzt. Es hat eine Teilchengröße von 5 – 300 µm. Die Reinigung erfolgte mit einem Arbeitsdruck von 0,5 – 1,5 bar, bei einem durchschnittlichen Bearbeitungsabstand von 5 – 15 cm. In vereinzelt

und schwer zugänglichen Bereichen, die mit der Strahldüse nur aus größerer Entfernung erreicht werden konnten, mußte mit einem Arbeitsdruck von bis zu 2 bar gearbeitet werden. Bei zwei Amphoren trat in Teilbereichen starker biogener Bewuchs auf: um eine zu lange Verweildauer des abrasiven Partikelstrahls zu vermeiden, wurde hier zunächst mit Heißdampf vorgereinigt.



Abb. 100: Probeflächen zur Abstimmung der Reinigungsparameter



Abb. 101: Bearbeitungsphasen während der Reinigung des Amphorenkörpers

In länger feucht bleibenden Bereichen, in denen es zu erhöhter Deposition von Schadstoffen kommt, wie an Riss- und Tropfkanten, konnten die schwarzen Ablagerungen nur sukzessive durch eine längere Verweildauer des Partikelstrahles gedünnt werden. Aufgrund der unterschiedlichen Verschmutzungszustände der Terrakottaoberflächen waren die einzelnen Vasen mit einem unterschiedlich hohen Arbeitsaufwand zu reinigen.

9.3 Fehlstellenbehandlung

Die zu bearbeitenden Vasen wiesen eine Reihe von fehlenden plastischen Details und kleineren Fehlstellen durch Ausplatzungen auf. Die Einheitlichkeit der Dekorformen gestattete eine Ergänzung der verlorengegangenen Teile auf der Grundlage von Abgüssen analoger Teilbereiche. Hierzu wurden Abformungen mit Silikonkautschuk vorgenommen und Abgüsse mit einem für Terrakottaersatz geeigneten mineralischen Gußmörtel hergestellt. Als Material für die Ergänzungsstücke wurde eine Abgussmasse verwendet, die im Zuge einer Diplomarbeit über Zementstuckergänzung an der FH Potsdam entwickelt worden war (Rezeptur s.u.).



Abb. 102: Abformung von Henkel und Pinienzapfen



Abb. 103: Abformung des Sockels



Abb. 104: Formergänzung (Ansatz Kunststeinvolute)



Abb. 105: Formergänzung (Überarbeitung Ansatznaht)



Abb. 106: Formergänzung (Farbretusche des Kunststeins)

Wie die naturwissenschaftlichen Untersuchungen ergaben, ist dieses Material vor allem aufgrund seiner

- hohen Festigkeit
- geringen Wasseraufnahme
- niedrigen E-Moduls

gut für die Verwendung als Ergänzungsstoff an den zu bearbeitenden Terrakotten geeignet. Dazu wurde für die Gußmasse eine modifizierte Rezeptur zur Anpassung an die Eigenschaften der Terrakotten entwickelt:

- 25 RT Portlandzement
- 25 RT Weißkalkhydrat
- 50 RT gewaschener Sand (0 - 2 mm)
- 7 RT Pigment (französischer Ocker)

Die so gewonnenen und durch nachträgliche Bearbeitung an die Bruchflächen angepassten Gießlinge wurden durch V4A- oder GFK-Stäbe mit dem Original verdübelt. Als Klebemittel wurde ein modifiziertes Epoxidharz verwendet. Letzte noch vorhandene farbliche Abweichungen vom Originalmaterial wurden durch eine Lasur mit Pigmenten und einem Acrylat als Bindemittel ausgeglichen.

Zur oberflächlichen Schließung von Rissen und für Kittungen wurde die Gußmasse mit einer feineren Sieblinie und einem geringen Kunststoffanteil wie folgt modifiziert:

- 20 RT Portlandzement
- 19 RT Weißkalkhydrat
- 60 RT gewaschener Sand (0 – 0,4 mm)
- 7 RT Pigment (französischer Ocker)
- 1RT Acrylharzdispersion (Styrolit)

9.4 Klebung und Rissinjektage

Die Verklebung von Bruchflächen und Dübeln erfolgte gemäß den Empfehlungen der Projektpartner vollflächig mit einem modifizierten Epoxidharz:

- 3 ml Araldit BY 158
- 0,15 g Cobosil
- 0,4 g Hohlglaskugeln



Abb. 107: Fehlstelle vor Verklebung



Abb. 108: Fehlstelle mit verklebtem Teilstück

Die Zumischung von Hohlglaskugeln und pyrogener Kieselsäure (Cabosil) zielt darauf ab, den thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Epoxidharzes zu senken und Schäden durch Wärmedehnung infolge starker Sonneneinstrahlung vorzubeugen.

Zur kraftschlüssigen Verfüllung von Haarrissen wurde das niedrigviskose Epoxidharz Viscacid 100 der Firma REMMERS injiziert. Klaffende Risse, die nicht mit dem Harz überbrückt werden konnten, wurden mit der oben beschriebenen Ergänzungsmasse geschlossen.

9.5 Montage und Wiederaufstellung

Das in mehreren Arbeitstreffen gemeinsam entwickelte Wiederaufstellungskonzept zielt darauf ab, eine nachhaltige, d.h. dauerhaft stabile Form der Aufstellung zu finden, die die nötige Verkehrssicherheit bietet und gleichzeitig reversibel, also noch demontierbar ist.

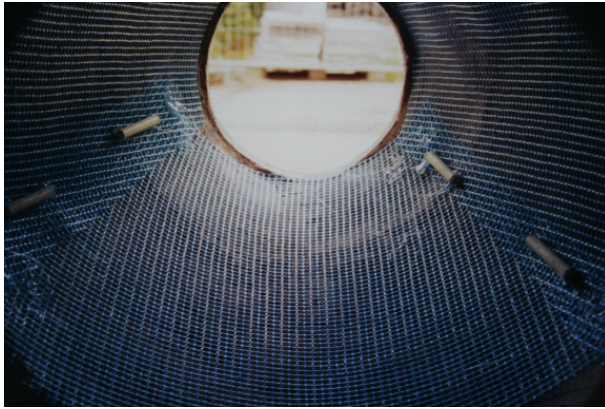


Abb. 109: Innenlaminierung des Vasenkörpers



Abb. 110: Montagegestange als Versatzhilfe

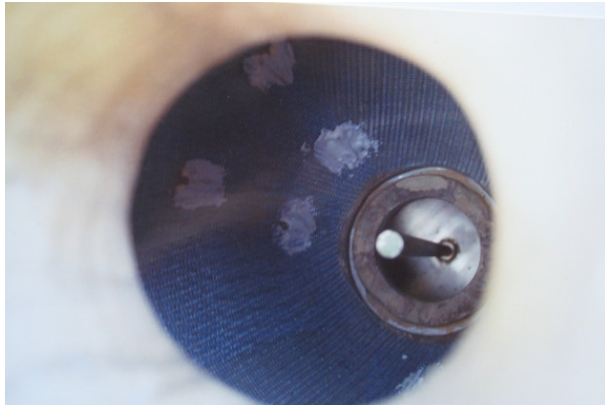


Abb. 111: Blick in Vasenkörper nach Montage

Um Vasenkörper und –Fuß fest miteinander zu verbinden, wurde zunächst eine Verklebung der beiden Teile vorgenommen. Da die Klebefläche sehr klein ist, werden die Teile zusätzlich durch eine Edelstahlstange gegeneinander verschraubt. Das untere Widerlager dieser Schraubverbindung bildet eine Edelstahlplatte an der Plinthenunterseite. Um eine bessere Kräfteverteilung zu erreichen und einer punktuellen Übertragung von Windlasten auf die bereits geschwächte Gefäßwandung im unteren Teil des Vasenkörpers entgegenzuwirken, wird die Stange im oberen Teil der Vase durch eine Grobkiesfüllung gekontert, die mit einer dünnen Mörtelschicht abschließt. Da eine starre Verbindung von Füllung und Gefäßwandung vermieden werden soll, wurde bewusst eine lose Kiesschüttung gewählt und die Mörtelschicht nicht bis an die Gefäßwandung geführt. Ein Ausbrechen bereits angerissener Teilbereiche wird durch eine Laminierung mit Kunststoffgaze im Inneren der Vase verhindert werden.

Die Vase wird an der Plinthe durch Messingklammern, die in den Untergrund einbinden, auf der Brüstung fixiert.

9.6 Maßnahmen an Referenzobjekten

Entsalzung (Römisches Bad Bacchantengelage)

Mikroskopische Untersuchungen der Amtlichen Materialprüfungsanstalt Bremen an Proben des Terrakottareliefs „Bacchantengelage“ (Römische Bäder) hatten ergeben, dass neben den sichtbaren Ablagerungen auf der Oberfläche, auch Schadstoffanreicherungen im oberflächennahen Porenraum auftreten. Bei den beobachteten Kryptoeffloreszenzen handelt es sich um Gips, dessen Ionenbausteine wahrscheinlich aus dem Gipsmörtel des Mauerwerkes unter Einfluss von sauren Wässern eingetragen wurden.

Nach der Beseitigung der oberflächlichen Ablagerungen mit dem oben beschriebenen Reinigungsverfahren wurde der Gips stellenweise an der Oberfläche sichtbar. Um eine wirksame Mobilisierung und Entfernung dieses schwer löslichen Salzes zu erreichen, wurde das Relief, das zunächst in situ restauriert werden sollte, ausgebaut und in der Werkstatt im Wasserbad entsalzt.

Durch fünfmaliges Wechseln des destillierten Wassers konnte die Leitfähigkeit der Salzlösung und von 3600 auf 35 reduziert und somit die Salzkonzentration im Porenraum der Terrakotte stark verringert werden.

Vorbeugende Maßnahmen (Römisches Bad Bacchantengelage)

Um eine erneute Versalzung des wertvollen Terrakottareliefs zu verhindern, darf ein Feuchteausgleich mit dem Mauerwerk zukünftig nicht mehr stattfinden. Dazu muss das Relief rückwärtig, unten, oben sowie seitlich isoliert werden. Zur Feuchtesperrung wurde das Relief deshalb in einen Edelstahlkasten eingesetzt. Der Kasten aus Edelstahlblech wird in die Mauernische eingelassen und ist von außen weitgehend unsichtbar.

An Form und Verteilung der Ablagerungen auf der Oberfläche der Reliefs waren Wasserablaufspuren deutlich ablesbar. Einer erneuten Bildung von Krusten und ihrer Akkumulation in den Regenschattenzonen soll deshalb durch ein verbessertes System der Regenwasserableitung entgegengewirkt werden.

Damit das Wasser abtropfen kann, ohne die Terrakotten zu befeuchten, wird oberhalb der Reliefs eine in die Mauerfuge einbindende und 15 cm hervorkragende Zinkblechverdachung angebracht.

10 Öffentlichkeitsarbeit

Am 04. Juli 2006 fand im Schloß Lindstedt die Abschlußtagung zum Projekt statt. Nach Begrüßung der Teilnehmer durch den Generaldirektor der Stiftung Preußische Schlösser und Gärten, Prof. Dr. Hartmut Dorgerloh sowie die Rektorin der Fachhochschule Potsdam, Prof. Dr. Helene Kleine folgten 18 Fachvorträge vor 56 Teilnehmern.

Als wichtige weitere Komponente der Öffentlichkeitsarbeit ist eine in der Pflanzhalle der Neuen Orangerie präsentierte Ausstellunginsel und Schaustelle zu nennen. Im Rahmen der SPSG-Ausstellungskampagne „Restaurierung in der SPSG –Eisen, Stein und Marmor bricht“ wurden dezentrale, thematische Ausstellungsinselformen installiert. Die projektbezogene Ausstellung (siehe Poster Deckblatt) zeigte an realen Terrakottaexponaten Musterkonservierungen, erläuternde Posterpräsentationen begleiteten.

11 Verzeichnisse

11.1 Projektinterne Literatur

Bernitz, Juliane; Jacobsen, Helen	2004	Reinigung von Terrakottaoberflächen. Untersuchungen zu Feinstrahlreinigungen an Probekörpern zum Nachweis der Qualität und des Schadenspotenzials (Projektdokumentation zum WS 2003/04 und zum SoSe 2004 in der Studienrichtung Konservierung und Restaurierung von Steinobjekten an der Fachhochschule Potsdam)
Bernitz, Juliane	2006	Reinigung von Terrakottaoberflächen. Eine systematische Bewertung der Feinstrahlreinigung anhand von Probekörpern und Originalbruchstücken einer Amphore der Stiftung Schlösser und Gärten Potsdam (Untersuchungsbericht zum Sommersemester 2005)
D'ham, Gerhard	2006	Abschlußbericht des Studienganges Steinrestaurierung der FH Potsdam
Eckermann, Wulf	2006	Terrakotta-Amphoren der Neuen Orangerie Potsdam – Bauklimatische Untersuchung
Grzimek, Tomas	2006	Einige Gedanken aus baukeramischer Sicht zu den Terrakotten in Potsdam-Sanssouci (ohne Paginierung)
Hunger, Steffi; Pfeifruck, Jenny	2005	Terrakotta-Amphoren vom Dach des Orangerieschlusses, Potsdam, Park Sanssouci. Bestandserfassung, Schadenserfassung, Beurteilung des Restaurierungsbedarfs
Hunger, Steffi; Pfeifruck, Jenny; Röttger, Kai	2006	Eine Terrakotta-Amphore der Orangerie Sanssouci, Potsdam. Entwicklung eines Klebstoffs für Terrakotta, Herstellung eines Abgusses (Projektdokumentation zum WS 2004/05 und zum SoSe 2005 in der Studienrichtung Konservierung und Restaurierung von Objekten aus Stein an der Fachhochschule Potsdam)
Pietrowski, Nora	2005	Archivrecherche zu historischen Firmenkatalogen preußischer Terrakotta-manufakturen
Röttger, Kai	2005	Die Terrakotta-Amphoren auf dem Mittelbau der Neuen Orangerie Potsdam – Sanssouci. Archivalienrecherche
Sänger, Julia; Mihan, Gunilla; Herlyn, Frauke; Böhm, Eckhart	2003	Untersuchungen zur Reinigung von Terrakottaoberflächen (Projektdokumentation zum WS 2002/03 und zum SoSe 2003 in der Studienrichtung Konservierung und Restaurierung von Objekten aus Stein an der Fachhochschule Potsdam)
Schlütter, Frank	2004	Mikroskopische Untersuchungen an gereinigten und ungereinigten Terrakotten (Untersuchungsbericht M-6001-04 vom 29.07.2004)
Schlütter, Frank	2005	Materialkundliche Untersuchungen an Terrakotta und Mörtel von Vasen aus dem Park Sanssouci sowie an Kunststoffklebematerialien. (Untersuchungsbericht M 6072-05 vom 02.11.2005)
Schlütter, Frank	2006	Mikroskopische Untersuchungen zur Zustandserfassung ausgewählter Terrakottaobjekte im Park Sanssouci (Untersuchungsbericht M-6003-05 und 6073-05)
SPSG	2003	Beseitigung umweltbedingter Schadstoffanreicherungen auf wertvollen Architekturteilen und Bauzierelementen aus Terrakotta am Beispiel der Neuen Orangerie im Park Potsdam-Sanssouci (Brandenburg). (UNESCO-Weltkulturerbe)“. Antrag zur Projektförderung durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (12.05.2003)
Wallasch, Sven	2004	Terrakotten in Potsdam-Sanssouci und Potsdam-Babelsberg, Bericht zum Material- u. Schadenskataster keramischer Bildwerke und Bauteile
Will, Astrid	2004	Bericht über die (1.) Erprobung und Bewertung von chemischen Reinigungsmethoden angewendet auf Terrakottaoberflächen mit schwarzer Kruste und (2.) Methode zum Härtevergleich von Terrakottaoberfläche und Schmutzkruste

Zimmermann, Tom 2006 Restaurierungsbericht: Proberestaurierung an ausgewählten Terrakottaobjekten der Stiftung Preußische Schlösser und Gärten
 Böhm, Eckhart

11.2 Weitere zitierte Literatur

- Borrmann, T.; Schlütter, F.; Juling, H.; Heuser, H.; Hoffmann, M. 1994 Mikroskopische Beurteilung trocken gereinigter Bauwerksteine am Beispiel des Schlaitdorfer Sandsteins, in: Snethlage (Hg., 1994): Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm Steinzerfall – Steinkonservierung, Band 4 – 1992, S. 157-164
- Conahan, H. 1999 An Assessment of the Effects of Hydrofluoric Acid Based Cleaners on Unglazed Architectural Terra Cotta, in: Wittmann, F.H.; Gerdes, A. (Hg.): Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen V, Esslingen, S. 1427-1437
- Domaslowski, Wieslaw; Kesy-Lewandowska, Maria, Lukaszewicz, Jadwiga W. 1998 Badania nad konserwacja murów ceglanych (Untersuchungen zur Konservierung von Ziegelmauern)
- Ettl, Hans; Schuh, Horst 1998 Schwarze Krusten: Die Reinigung von Natursteinoberflächen, in: Snethlage (Hg., 1998): Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm Steinzerfall – Steinkonservierung, Band 6 – 1994-1996, S. 113-121
- Falbe, Jürgen; Regitz, Manfred 1995 CD Römpp Chemie Lexikon
- Grassegger, Gabriele (FMPA Baden-Württemberg) 1998 Untersuchungsbericht. Überprüfung der Reinigungswirkung der „Rotec-Vario-Wirbelstrahldüse“ und der „Rotec-Micro-Wirbelstrahldüse“ im Vergleich zu anderen Düsen am Beispiel verschiedener Verschmutzungstypen am Ulmer Münster und der Stadtkirche in Schorndorf sowie unter Laborbedingungen. Getestete Materialien: Sandsteine, Kalksteine, Terrakotten und Glasuren
- Grassegger, Gabriele (FMPA Baden-Württemberg) 2004 Technisch-Naturwissenschaftliche Begleituntersuchungen zu restauratorischen Feinstrahlreinigungen an mehreren Baudenkmälern zum Nachweis der Qualität, in: Grassegger-Schön, G., Patitz, G. (Hg.): Natursteinsanierung Stuttgart 2004, S. 7-22
- Habermann, Hans 1991 Fassadenwäsche am Regensburger Dom. Ein Bericht über die Reinigungsmaßnahmen mit dem pat. JOS-Niederdruck-Rotationswirbelverfahren, in: Stein, Heft 1/1991
- Hoffmann, M; Heuser, H.; Prickartz, R. 1994 Beurteilungskriterien für die Reinigung von Natursteinfassaden aus Sandstein mit einem Trockenstrahlverfahren, in: Snethlage (Hg., 1994): Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm Steinzerfall – Steinkonservierung, Band 4 – 1992, S. 147-155
- Reimann-Oenel, Regine 2004 Einfluss von chemischer Reinigung und Lasuren auf die Dauerhaftigkeit von Sandsteinfassaden. Dissertation an der TU Hamburg-Harburg
- Rousset, Bénédicte; Gal, Géraldine; Giradet, Fred; Béal, Cédric; Constantin, Jérôme 2004 Roughness Measurement applied to the Monitoring and the follow-up of Building Cleaning, in: Kwiatkowski, D.; Löfvendahl, R. (Hg.): Proceedings of the 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Band 2, S. 603-610
- Siedel, Heiner; Sobott, Robert; Bauer-Bornemann, Ullrich 2005 Laserstrahlreinigung von Natursteinoberflächen – Möglichkeiten und Grenzen, in: Siegesmund, S.; Auras, M.; Snethlage, R.: Stein. Zerfall und Konservierung
- Snethlage, Rolf; Wendler, Eberhard 1995 Methoden der Steinkonservierung – Anforderungen und Bewertungskriterien, in: Snethlage, R. (Hg.): Denkmalpflege und Naturwissenschaft. Natursteinkonservierung I

Snethlage, Rolf	1997	Leitfaden Steinkonservierung
Vergès-Belmin, Véronique	1996	Laser für die Reinigung von Notre-Dame in Paris? Im Vergleich mit Mikrosandstrahlen und Ammoniumcarbonat-Kompressen, in: Restau- ro, Heft 6/1996, S. 420-424
Werner, M. (IBB - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb der RWTH Aachen)	1988	JOS-Verfahren, eine Reinigungsmethode für Naturstein
Werner, M. (IBB)	1991	JOS-Microdüse, ein Reinigungsverfahren für Naturstein
Wihr, Rolf	1986	Restaurierung von Steindenkmälern

12 Anhang

12.1 Angaben zur Reinigungstechnik und zu den Reinigungsmitteln

12.1.1 Geräte

Gerät	Hersteller	Vertrieb	Technische Daten
Dampfstrahlgerät Supersteam	REITEL Feinwerktechnik Senfdamm 20 49152 Bad Essen Telefon: 05472/9432-0 Telefax: 05472/9432-40	Deffner & Johann Mühläcker Str. 13 97520 Röthlein Telefon: 09723/2044 Telefax: 09723/4889	Netzanschluß: 230 V / 50 Hz Aufnahmeleistung: 1600 W Temperatur: 145°C Dampfdruck: 0-6 bar, variabel Tankvolumen: 5 l Feuchtigkeit und Menge stufenlos regelbar; Trocken-, Nassdampf und Heißwasser möglich
Nebulizzatore (Impianto di Atomizzazione)	C.T.S. s.r.l. Via Piave, 20/22 I-36077 Altavilla Vicentina (Vi) Telefon: +39(0)444/349088 Telefax: +39(0)444/349039	R. & C. s.r.l. restauro & conservazione Viale Milano, 5/a I-36051 Olmo di Creazzo (Vi) Telefon: +39(0)444/522788	Luftdruck: 2,5-3,5 atm, variabel Wasserdruck: 1-2 atm, variabel Düsenanzahl: 4 Düsenöffnungs-nennweite: 2,5 mm
JOS-Rotationsstrahlgerät	Radler & Ruf Sandstrahl- und Druckluftbedarf GmbH Am Bockusbach 4 86733 Alerheim-Rudelstetten Telefon: 09085/524 oder 1650 Telefax: 09085/1621		Strahldruck: 0,5-4 bar, variabel Strahldüse: Piccolodüse Düsenöffnungs-nennweite: 3 mm Luftmenge: 500 l/min. Wassermenge: 5-10 l/h Granulatmenge: 1-5 kg/h
Feinstrahlgerät FG 1-93 Restau- ro	Wülsag Apparatebau AG Sandmaster®-Strahltechnik Mühlethalstr. 67/69 CH-4800 Zofingen Telefon: +41(0)627469202 Telefax: +41(0)627469205	Hasenfratz Sandstrahl- technik Am Ölfeld 5 85617 Assling Telefon: 08092/6491 Telefax: 08092/31432	Netzanschluß: 220 V / 50 Hz Strahldruck: 0,3-8 bar, variabel Korngrößen ca. 5-500 µ möglich Düsenöffnungs-nennweite: 1,2 mm Strahlmitteldosierung von 0-10 Stufen regelbar

12.1.2 Flusssäurehaltige Reinigungsmittel

Produkt	Hersteller	Vertrieb	Spezifikation
HF (Fluorwasserstoffsäure)			
(NH ₄)HF ₂ (Ammoniumhydrogenfluorid)			
RS Troplexin	Schmalstieg GmbH Postfach 11 22 30927 Burgwedel Telefon: 05139/7027 Telefax: 05139/2454	Schmalstieg GmbH Postfach 11 22 30927 Burgwedel Telefon: 05139/7027 Telefax: 05139/2454	Wässrige Mischung von Fluorwasserstoffsäure mit speziellen Wirkstoffen Dichte 1,0 g/cm ³ pH-Wert (Konzentrat): 3,37 Gehalt HF < 10 M.-% Gehalt Ethandiol 1-25 M.-% Gefahrenbezeichnung: T ⁺ (sehr giftig) und C (ätzend)

12.1.3 Strahlmittel

Strahlgutbezeichnung	Abkürzung	Bezugsquelle	Korngröße [µm]	Kornform	Härte [Mohs]	Dichte [g/cm³]	Spezifikation
Edelkorund F 360	EK 360	Hasenfratz Sand- strahltechnik Am Ölfeld 5 85617 Assling Fon: 08092/6491 Fax: 08092/31432	20-23	kantig, kubisch	Ca. 9	3,9	Synthetisches Strahlmittel (eisenfreies Aluminiumoxid) Keine Wasseraufnahme, Chemisch indifferent, Praktisch wasserunlöslich, Schmelzpunkt ca. 1950°C, Freie Kie- selsäure nicht nachweisbar Chemische Zusammensetzung: Al ₂ O ₃ 99,5 %; CaO+MgO 0,07 %; Fe ₂ O ₃ 0,01 %; Na ₂ O 0,18 %; SiO ₂ 0,2 %; TiO ₂ 0,01 %
Edelkorund F 600	EK 600	Hasenfratz	8-10	kantig, kubisch	Ca. 9	3,9	Dito
Edelkorund F 1200	EK 1200	Hasenfratz	2,3-3,9	kantig, kubisch	Ca. 9	3,9	Dito
Glasbruch Nr. 54	GB 54	Hasenfratz	250-500	kantig	Ca. 6-7	2,5	Mineralisches Strahlmittel Natronglas gehärtet und bleifrei; Regenerat aus gerei- nigtem Behälterglas Chemische Zusammensetzung: SiO ₂ min. 65 %; Al ₂ O ₃ 0,5-2,0 %; Fe ₂ O ₃ max. 0,15 %; MgO min. 2,5 %; CaO min. 8,0 %; Na ₂ O min. 14,0 %; Sonstige max. 2,0 %
Glasbruch Nr. 100	GB 100	Hasenfratz	110-210	kantig	Ca. 6-7	2,5	Dito
Glasperlen Nr. 6	GP 6	Hasenfratz	90-150	rund	Ca. 6-7	2,5	Mineralisches Strahlmittel Aus gebrochenem Natronglas (gehärtet und bleifrei) zu Kugeln erschmolzen Artfremde Verunreinigungen max. 0,1 M.-% Chemische Zusammensetzung (in M.-%): SiO ₂ min. 65 %; Al ₂ O ₃ 0,5-2,0 %; Fe ₂ O ₃ max. 0,15 %; MgO min. 2,5 %; CaO min. 8,0 %; Na ₂ O min. 14,0 %; Sonstige max. 2,0 %
Glasperlen Nr. 9	GP 9	Hasenfratz	10-50	rund	Ca. 6-7	2,5	Dito
Hohlglaskugeln S 22 Scotchlite	HGK	Dr. Georg Kremer Farbmühle Hauptstr. 41-47 88317 Aichstetten Fon: 07565/1011 Fax: 07565/1606	< 20 - 75	rund	Keine Angabe	0,22 (0,19- 0,25)	Mineralisches Strahlmittel Alkaliarmes Natron-Kalk-Borosilikatglas (97-100 %) amorphes Siliciumdioxid < 3 %

Strahlgutbezeichnung	Abkürzung	Bezugsquelle	Korngröße [µm]	Kornform	Härte [Mohs]	Dichte [g/cm ³]	Spezifikation
Bodenkalk	BK	unbekannt	300-1000		Ca. 3-3,5		Mineralisches Strahlmittel Aus Dolomit
Granatsand Garnit-Soft®	GS	Kominex Mineral- mahlwerk GmbH Am Selkebad 06463 Falkenstein Fon: 034743/9460 Fax: 034743/223	10-60	kantig, kubisch	7,5-8	4,1	Mineralisches Strahlmittel Schweres, inaktives, nicht metallisches, natürliches Mineral, Keine Wasseraufnahme, Chemisch indifferent Praktisch wasserunlöslich, Schmelzpunkt: 1250 °C, freie Kieselsäure nicht nachweisbar Chemische Zusammensetzung: Al ₂ O ₃ 20-25 %; TiO ₂ ca. 1,0 %; SiO ₂ 24-36 %; FeO ca. 31 %; CaO ca. 1 %; MgO 5-7%; MnO ca. 1 %
Rotosoft® Glaspudermehl Microfein	GPM	Weisenburger Strahltechnik Bahnhofstr. 11 76776 Neuburg Fon: 0721/95092-0 Fax: 0721/95092-22	40-80	kantig, kubisch	6-7	2,5-2,6	Mineralisches Strahlmittel Basierend auf aufbereiteter Aluminiumsilikatglasschmel- ze, Praktisch wasserunlöslich Chemische Zusammensetzung: H ₂ SiO ₃ 49-51 %; Al 28- 30 %; FeO 10-12 %; CaO 2-4 %; K ₂ O 2-4 %
Rotosoft® Steinpuder- mehl	SPM	Weisenburger Strahltechnik	5-300 µm	kantig, kubisch	3-3,5	2,7	Mineralisches Strahlmittel Aus Dolomit, Praktisch wasserunlöslich Chemische Zusammensetzung: CaO min. 30 %; MgO min. 21 %; R ₂ O ₃ 0,05-0,10 %; Fe ₂ O ₃ 46,5 %
Weichstrahlmittel S (Naturalblast)	WSS	Hasenfratz	100-250 µm	kantig	2,5	0,9	Organisches Strahlmittel Aus Walnussschalen

12.2 Mikroskopisch-fotografische Untersuchungs- und Dokumentationstechnik

12.2.1 Geräte

Gerät	Hersteller	Technische Daten
Foto-Stereomikroskop Askania GSZ 2T	Mikroskop Technik Rathenow GmbH Grünauer Fenn 40 D-14712 Rathenow Fon: 03385 / 53710 www.askania.de	<ul style="list-style-type: none"> • Achromatisch korrigierte Zoomobjektive mit Faktor 5:1 • Achromatisch korrigierte Okulare, Faktor 10 x • Vorsatzlinse, Faktor 2 x (Gebrauch bei fotografischer Befunddokumentation nicht zu empfehlen) • Achromatisch korrigiertes Projektiv 3,2 x zur Ankopplung einer Kamera (ausgelegt für analoge Kleinbildfotografie) • Wahrscheinliches Baujahr des Mikroskops 1992-1998
Beleuchtung	Kohlrusch	<ul style="list-style-type: none"> • 150 Watt Quecksilberdampflampe • Farbtemperatur 5200 K • Weiße Blendenklappen
Digitalkamera Fuji FinePix S2 Pro	Fuji	<ul style="list-style-type: none"> • 23,3 x 15,6 mm Super CCD-Chip mit 6.170.000 Bildpunkten • Farbtiefe 36 Bit • Auflösung: 4.256 x 2.848 Bildpunkte (interpoliert) 3.024 x 2.016 Bildpunkte 2.304 x 1.536 Bildpunkte 1.440 x 960 Bildpunkte • Belichtungssteuerung: Programmautomatik, Zeitautomatik, Blendenautomatik, Manuelle Belichtung • Dateiformat JPEG, TIFF, RAW • ISO 100/160/200/400/800/1600 • Verschlusszeiten 30 s bis 1/4.000 s, Bulb-Langzeitbelichtung • diverse Weißabgleichfunktionen • Nikon-Bajonettfassung

12.2.2.1 Einstellungen (Projektphase 2006)

Mikroskop

Da die optischen Achsen der Objektive im Winkel von 11° zueinander stehen, mussten die mikrofotografisch zu dokumentierenden Probekörper rechtwinklig zum linken Strahlengang geneigt werden. Bei einer Ausrichtung mit 10 % Steigung nach rechts konnte über das gesamte Gesichtsfeld eine gleichmäßige Bildschärfe erzielt werden. Ein Gebrauch der Vorsatzlinse empfahl sich wegen eklatanter Verschlechterung der Bildqualität nicht. Das Projektiv ist nicht für die Verwendung von Digitalkameras vorgesehen, da diese aufgrund ihres im Vergleich zum Kleinbilddfilmformat deutlich kleineren Sensors nur einen geringen Ausschnitt des virtuellen Bildes abbilden. Fokussiert wurde bei einäugiger Betrachtung über das linke Okular mit korrekt eingestelltem Dioptrienausgleich bei maximaler Zoomstellung und maximal geöffneter Blende. Zum Fotografieren wurde die Mikroskopblende maximal geschlossen, der Zoom auf Faktor 2 zurückgestellt und der Umlenkspiegel in den Strahlengang geklappt.

Beleuchtung

Die Leuchte war mit einem Winkel von ca. 80 Grad zur optischen Achse des Mikroskops ausgerichtet (Streiflicht). Der Abstand betrug bei den Prüfkörpern des Typus Albanische Gitterelemente stets 25 cm, bei dem Amphorenbruchstück 40 cm. Nach dem Einschalten der Lampe wurden 10 Minuten zum Erreichen einer gleichmäßigen Farbtemperatur abgewartet.

Digitalkamera

Die Belichtungssteuerung wurde manuell vorgenommen. Nach Ermittlung der optimalen Belichtungszeit via Graukarte und Testaufnahmen wurden jeweils sämtliche Aufnahmen für die beiden Probekörpertypen mit identischen Einstellungen vorgenommen. Dies führt zu einer korrekten Farb- und Hellig-

keitswiedergabe und macht eine individuelle Nachbearbeitung der Aufnahmen mit einem Bildbearbeitungsprogramm in der Regel überflüssig. Leider besitzt die Kamera keine Spiegelvorauslösung. Zur Vermeidung von Bewegungsunschärfe infolge Erschütterungen wurde mit Drahtauslöser und 10 Sekunden Zeitverzögerung ausgelöst (Selbstausröserfunktion). Weitere Einstellungen waren: ISO 200, Auflösungen Vorzustandsfotos 4.256 x 2.848, Nachzustandsfotos 3.024 x 2.016 Bildpunkte; Datenkomprimierung: fine; Weißabgleich: Auto WB; Farbeinstellung: STD (normal); Tonwert: STD (normal); Bildschärfe STD (normal).

Die Vor- und Nachzustandsaufnahmen wurden mit einem Bildbearbeitungsprogramm mittels Stapelverarbeitung auf einheitliche DateigröÙe gebracht.

12.3 Fotodokumentation des mit bloßem Auge sichtbaren Reinigungsergebnisses an Testflächen des Albanisches Gitter

12.3.1 Gereinigte Testflächen 2006



Testfläche 43 a I - Vorzustand



Testfläche 43 a I - Nachzustand



Testfläche 43 a II - Vorzustand



Testfläche 43 a II - Nachzustand



Testfläche 43 b I - Vorzustand



Testfläche 43 b I - Nachzustand



Testfläche 43 b II - Vorzustand



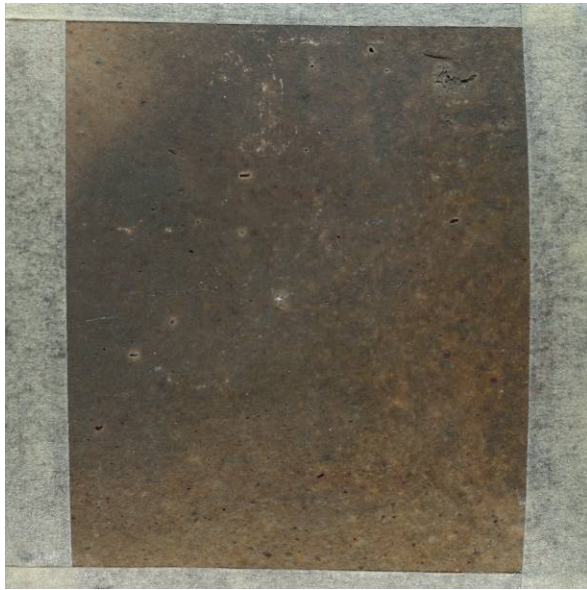
Testfläche 43 b II - Nachzustand



Testfläche 55 b I - Vorzustand



Testfläche 55 b I - Nachzustand



Testfläche 55 b II - Vorzustand



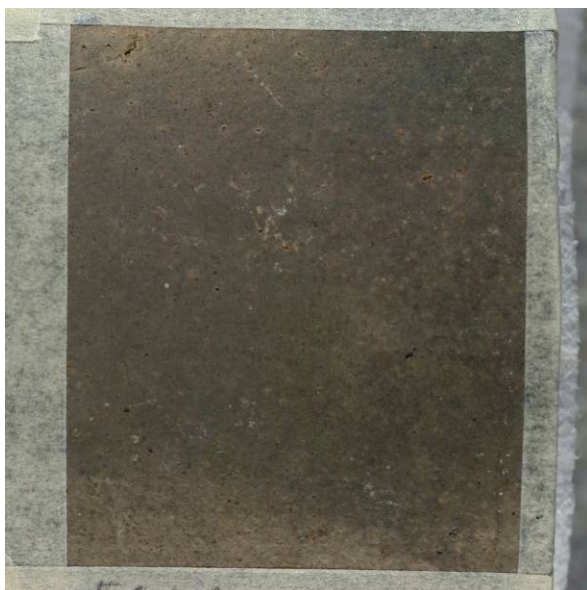
Testfläche 55 b II - Nachzustand



Testfläche 56 b I - Vorzustand



Testfläche 56 b I - Nachzustand



Testfläche 56 b II - Vorzustand



Testfläche 56 b II - Nachzustand



Testfläche 57 a II - Vorzustand



Testfläche 57 a II - Nachzustand



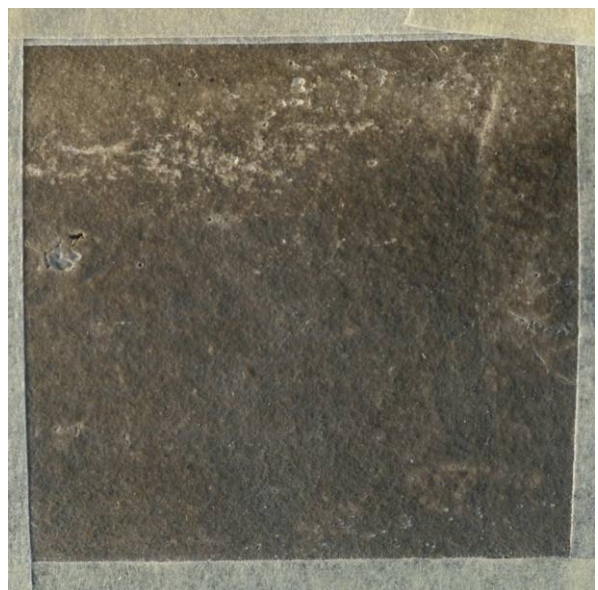
Testfläche 58 b I - Vorzustand



Testfläche 58 b I - Nachzustand



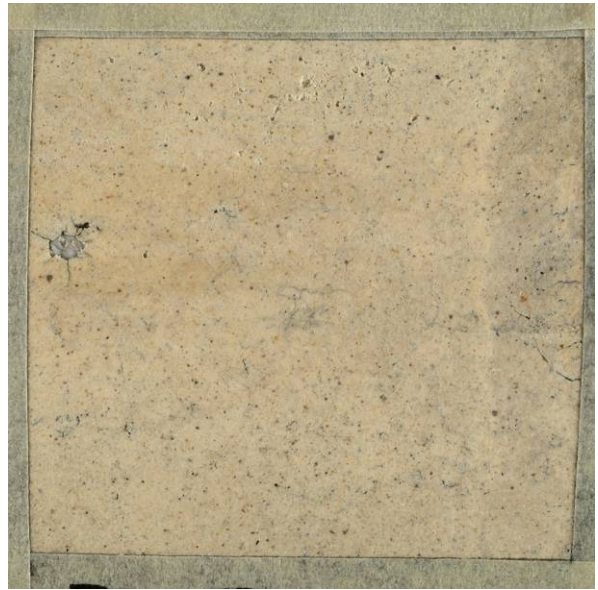
Testfläche 58 b II a - Vorzustand



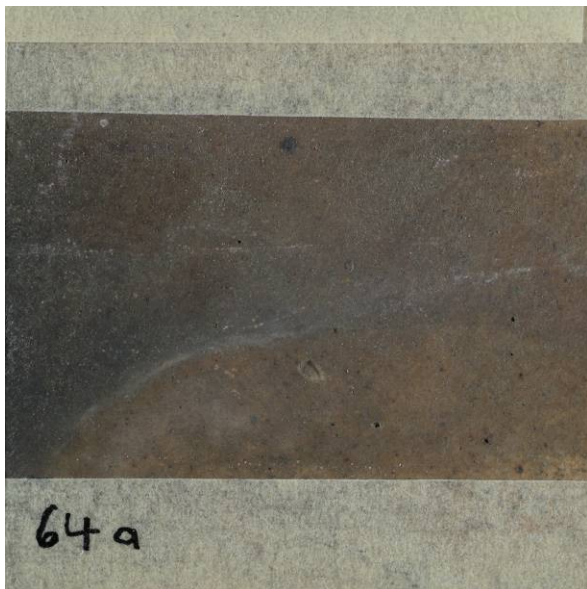
Testfläche 58 b II a - Nachzustand



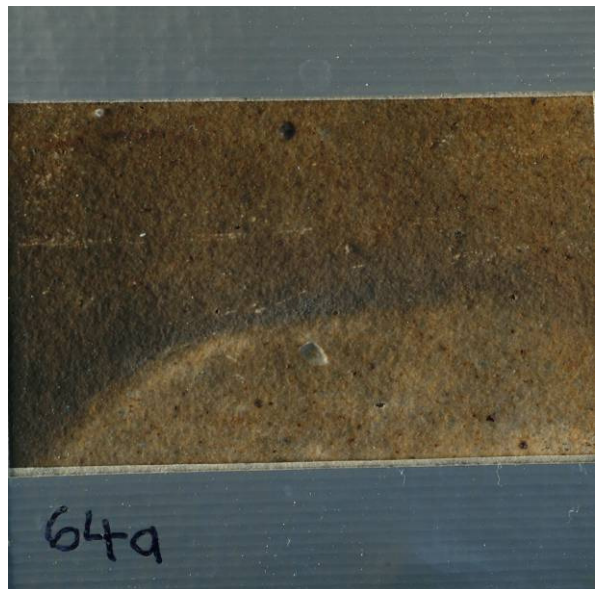
Testfläche 58 b II b - Vorzustand



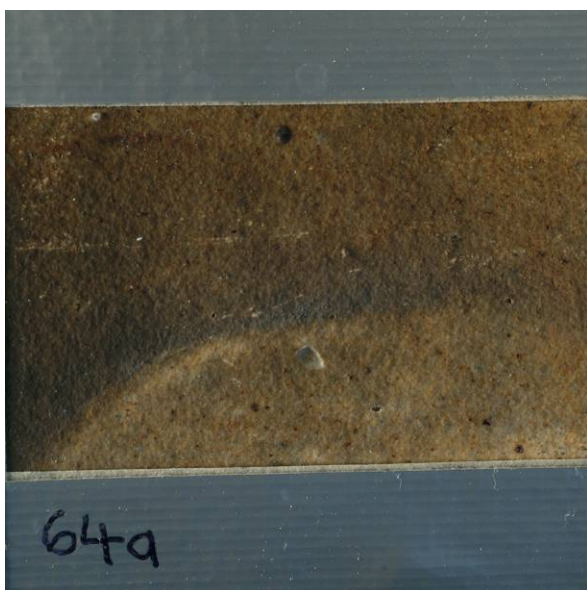
Testfläche 58 b II b - Nachzustand



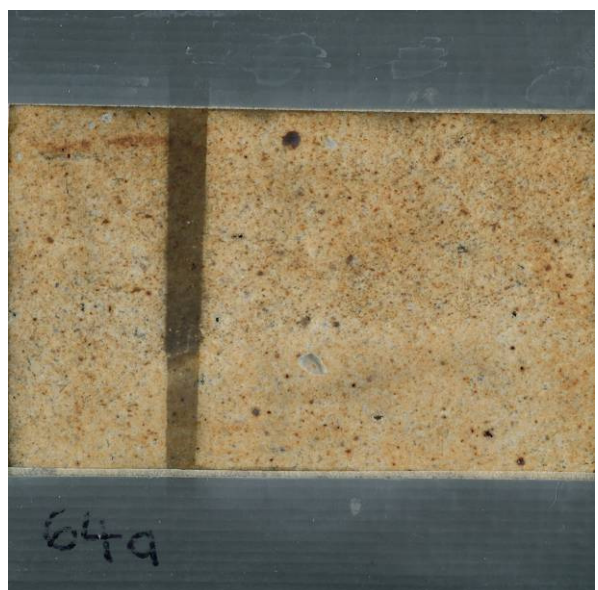
Testfläche 64 a,a - Vorzustand



Testfläche 64 a,a - Nachzustand



Testfläche 64 a,b - Vorzustand



Testfläche 64 a,b - Nachzustand



Testfläche 64 b - Vorzustand



Testfläche 64 b - Nachzustand



Testfläche 65 a I - Vorzustand



Testfläche 65 a I - Nachzustand



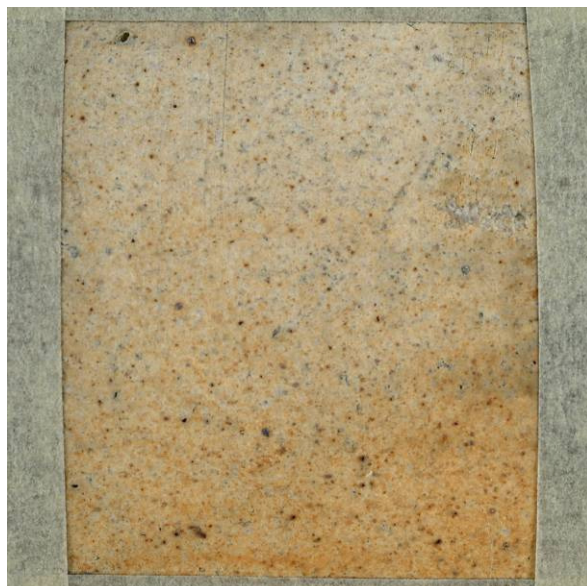
Testfläche 65 a II - Vorzustand



Testfläche 65 a II - Nachzustand



Testfläche 66 b I - Vorzustand



Testfläche 66 b I - Nachzustand

12.4 Bewertung von Schadensindikatoren an Testflächen des Prüfkörpertypus Albanisches Gitter

12.4.1 Gereinigte Testflächen 2006

Musterfläche	43 a I
Reinigungsverfahren	JOS, feucht-abrasives Rotationsstrahlverfahren
Reinigungsmittel	Rotosoft Steinpulvermehl (Weisenburger GmbH), 5-300 µm
Reinigungsparameter	Luftdruck 0,5 bar, Arbeitsabstand 5 ± 1 cm, Minimalstellung Strahlgutdosierung

Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten Phänomene			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene im Vergleich zum Vorzustand			
		Krateränder	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränder- veränder- ungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornum- gebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	B1	0	1	0	0	3	0	0
2	B1-2	1	1	1	1	2	0	0
3	JK2	2	1	0	2	1	1	0
4	AB5	1	0	1	1	2	0	1
5	BC4	3	0	2	2	2	0	2
6	C45	3	0	0	3	1	0	0
7	F4	3	1	0	3	0	0	0
8	B6	0	0	1	0	0	0	1
9	DE6	5	0	0	4	1	0	0
10	EF67	6	1	0	4	1	0	0
11	A8	2	0	1	2	0	0	1
12	CD78	1	1	0	1	0	0	0
13	DE78	5	0	1	2	2	0	0
14	I78	2	0	1	2	0	0	0
15	F9	5	1	1	5	0	0	0
16	K8	3	1	0	2	1	0	0
17	C10	1	3	1	1	0	0	1
18	AB1112	3	1	1	2	1	0	0
19	CD11	2	0	0	2	0	0	1
20	B12	3	0	0	2	1	0	0
21	D11	1	1	1	1	1	0	1
22	EF12	2	0	2	1	3	0	2
23	I12	3	0	2	3	1	0	2
24								
25								
Summe 1		57	13	16	46	23	1	12
Summe 2			86			82		
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]					81	40	8	75
Veränderungen gesamt [%]						95		

Testfläche 43 a I (2006)

Musterfläche	43 a II
Reinigungsverfahren	JOS, feucht-abrasives Rotationsstrahlverfahren
Reinigungsmittel	Rotosoft Glaspulvermehl microfein (Weisenburger GmbH), 40-80 µm
Reinigungsparameter	Luftdruck 0,5 bar, Arbeitsabstand 5 ± 1 cm, Minimalstellung Strahlgutdosierung

Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten Phänomene			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene im Vergleich zum Vorzustand			
		Krateränder	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränder- veränder- ungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornum- gebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	A1	2	2	1	2	0	1	1
2	H2	2	3	0	2	3	2	0
3	I2	2	0	1	2	1	0	0
4	K2	2	0	0	2	2	0	0
5	C3	2	0	0	2	2	0	0
6	B4	1	1	1	1	2	1	0
7	E34	2	0	1	0	2	0	1
8	CD45	0	0	1	0	0	0	0
9	E4	0	0	1	0	3	0	1
10	H4	1	0	2	1	0	0	1
11	B6	1	1	1	1	3	1	1
12	DE67	3	0	0	3	1	0	0
13	F56	2	3	1	2	2	3	1
14	F78	3	3	0	3	2	3	0
15	H9	1	0	1	1	1	0	1
16	J9	3	2	0	3	2	2	0
17	E11	1	0	1	1	1	0	1
18	G12	0	2	1	0	1	2	1
19	I11	1	1	1	0	1	1	0
20	JK11-12	2	0	1	2	2	0	1
21	B1213	1	1	2	1	0	1	0
22	J13-14	3	3	1	3	0	3	0
23								
24								
25								
Summe 1		35	22	18	32	31	20	10
Summe 2			75			93		
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]					91	89	91	56
Veränderungen gesamt [%]						124		

Testfläche 43 a II (2006)

Musterfläche	43 b I
Reinigungsverfahren	JOS, feucht-abrasives Rotationsstrahlverfahren
Reinigungsmittel	Edekorund F 600 (Hasenfratz), 8-10 µm
Reinigungsparameter	Luftdruck 0,5 bar, Arbeitsabstand 5 ± 1 cm, Minimalstellung Strahlgutdosierung

Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten Phänomene			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene im Vergleich zum Vorzustand			
		Krateränder	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränder- veränder- ungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornum- gebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	FG2	0	0	6	0	0	0	0
2	I1	2	0	8	0	0	0	0
3	J1-2	2	1	7	0	0	0	0
4	JK2	4	1	9	0	0	0	0
5	JK12	2	0	14	0	0	0	0
6	K2	3	4	5	0	0	0	0
7	E23	2	0	11	0	0	0	0
8	FG4	3	0	4	2	0	0	1
9	K4	2	7	3	0	0	0	0
10	DE6	3	3	9	1	0	0	0
11	AB67	4	0	2	0	0	0	0
12	IJ78	4	0	6	0	0	0	0
13	JK8	3	1	3	1	0	0	0
14	K7	3	0	4	0	0	0	0
15	C89	2	1	5	0	0	0	0
16	DE910	1	0	10	0	0	0	0
17	D12	3	1	9	0	0	0	0
18	G12/13	3	2	12	0	0	0	1
19	C1213	5	2	13	0	0	0	0
20	G1314	0	2	6	0	0	0	0
21								
22								
23								
24								
25								
Summe 1		51	25	146	4	0	0	2
Summe 2			222			6		
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]					8	0	0	1
Veränderungen gesamt [%]						3		

Testfläche 43 b I (2006)

Musterfläche	43 b II
Reinigungsverfahren	JOS, feucht-abrasives Rotationsstrahlverfahren
Reinigungsmittel	Granalsand Garnit-Soft (Kominex), 10-60 µm
Reinigungsparameter	Luftdruck 0,5 bar, Arbeitsabstand 5 ± 1 cm, Minimalstellung Strahlgutdosierung

Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten Phänomene			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene im Vergleich zum Vorzustand			
		Krateränder	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränder- veränder- ungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornum- gebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	E2	2	1	4	2	2	1	4
2	H2	1	1	6	1	1	1	5
3	IJ1-2	3	3	3	3	2	2	3
4	K1-2	1	0	1	1	1	0	1
5	B2-3	2	0	6	2	6	0	6
6	AB3-4	4	2	8	3	0	1	8
7	DE3	2	1	2	2	0	0	2
8	F3	0	0	6	0	1	0	6
9	J3	1	0	8	1	1	0	8
10	H5	2	0	5	2	0	1	4
11	A6	2	3	1	2	2	2	1
12	B6	2	0	6	2	2	0	6
13	HI56	4	2	6	4	0	2	6
14	HI6	4	1	8	4	2	1	8
15	B89	3	1	7	2	1	0	6
16	BC9	0	0	8	0	1	0	5
17	G9	2	1	5	2	1	1	4
18	E10	2	0	5	2	4	0	2
19	F10	0	1	3	0	0	0	3
20	H12	0	1	5	0	1	1	5
21								
22								
23								
24								
25								
Summe 1		37	18	103	35	28	13	93
Summe 2			158			169		
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]					95	76	72	90
Veränderungen gesamt [%]						107		

Testfläche 43 b II (2006)

Musterfläche	55 b I
Reinigungsverfahren	Laserstrahl
Reinigungsmittel	gepulster Nd:YAG-Laser Arlight NL 102 (Fa. BM Industries / Soliton)
Reinigungsparameter	1064 nm, 120-160 mJ, Fokus 3, ohne Oberflächenbefuchtung

Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten Phänomene			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene im Vergleich zum Vorzustand			
		Krateränderungen	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränderungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornumgebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	AB2	4	2	0	0	0	0	0
2	B2	5	2	0	0	0	0	0
3	J1	6	0	0	0	0	0	0
4	J2	4	0	1	0	0	0	0
5	B5	3	2	0	0	0	0	0
6	F34	5	0	1	0	0	0	0
7	I78	1	0	2	0	0	0	0
8	J8	2	2	1	0	0	0	0
9	J89	0	0	2	0	0	0	1
10	K9	4	0	2	0	0	0	0
11	B1011	4	1	2	0	0	0	0
12	BC11	0	1	1	0	0	0	0
13	FG11	1	0	1	0	0	0	0
14	H11	3	0	0	0	0	0	0
15	JK11	3	2	0	0	0	0	0
16	I12	4	0	4	0	0	0	0
17	E11	4	2	2	0	0	0	0
18	BC1314	3	0	1	0	0	0	0
19	D1314	3	0	3	0	0	0	0
20	JK13	3	2	3	0	0	0	0
21								
22								
23								
24								
25								
Summe 1		62	16	26	0	0	0	1
Summe 2		104					1	
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]					0	0	0	4
Veränderungen gesamt [%]							1	

Testfläche 55 b I (2006)

Musterfläche	55 b II
Reinigungsverfahren	Laserstrahl
Reinigungsmittel	gepulster Nd:YAG-Laser Arlight NL 102 (Fa. BM Industries / Soliton)
Reinigungsparameter	1064 nm, 120-160 mJ, Fokus 3, mit Oberflächenbefuchtung

Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten Phänomene			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene im Vergleich zum Vorzustand			
		Krateränderungen	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränderungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornumgebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	FG1-2	5	0	3	0	0	0	0
2	H1	2	0	3	0	0	0	0
3	J2	4	0	0	0	0	0	0
4	K2	0	2	1	0	0	0	0
5	J6	2	0	1	0	0	0	0
6	I67	1	0	2	0	0	0	0
7	CD6	4	0	0	0	0	0	0
8	A78	1	0	1	0	0	0	0
9	EF78	3	0	0	0	0	0	0
10	B9	2	0	0	0	0	0	0
11	AB9	3	5	0	0	0	0	0
12	DE910	1	1	0	0	0	0	0
13	GH910	2	1	2	0	0	0	0
14	K910	1	0	2	0	0	0	0
15	K10	1	3	1	0	0	0	0
16	AB11	2	1	0	1	0	0	0
17	F12	1	0	1	0	0	0	0
18	G12	3	1	2	1	0	0	0
19	E13	1	0	1	0	0	0	0
20	F1314	4	0	0	0	0	0	0
21								
22								
23								
24								
25								
Summe 1		43	14	20	2	0	0	0
Summe 2		77					2	
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]					5	0	0	0
Veränderungen gesamt [%]							3	

Testfläche 55 b II (2006)

Musterfläche	56 b I
Reinigungsverfahren	Laserstrahl
Reinigungsmittel	gepulster Nd:YAG-Laser Arlight NL 102 (Fa. BM Industries / Soliton)
Reinigungsparameter	1064 nm, >230 mJ, Fokus 6, ohne Oberflächenbefuchtung

Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten Phänomene			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene im Vergleich zum Vorzustand			
		Krateränderungen	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränderungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornumgebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	A1	2	0	3	0	0	0	0
2	C1	1	0	2	0	0	0	1
3	DE2	0	3	6	0	0	0	0
4	FG2	3	0	2	0	0	0	0
5	LM1-2	0	0	5	0	0	0	0
6	A4	2	1	8	0	0	0	0
7	E34	2	1	5	0	0	0	0
8	L4	0	1	5	0	0	0	0
9	G5	3	0	0	0	0	0	0
10	BS6	1	0	5	0	0	0	0
11	DE67	4	0	5	0	0	0	0
12	FG7	2	0	3	0	0	0	0
13	H6	3	1	3	0	0	0	0
14	A78	1	0	3	0	0	0	0
15	EF89	2	1	0	0	0	0	0
16	MG	1	0	0	0	0	0	0
17	E1011	2	1	2	0	0	0	0
18	D11	2	0	5	0	0	0	0
19	GH1011	3	1	2	0	0	0	0
20	JK1213	1	2	1	0	0	0	0
21								
22								
23								
24								
25								
Summe 1		35	12	65	0	0	0	1
Summe 2		112					1	
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]					0	0	0	2
Veränderungen gesamt [%]							1	

Testfläche 56 b I (2006)

Musterfläche	56 b II
Reinigungsverfahren	Laserstrahl
Reinigungsmittel	gepulster Nd:YAG-Laser Arlight NL 102 (Fa. BM Industries / Soliton)
Reinigungsparameter	1064 nm, >230 mJ, Fokus 6, mit Oberflächenbefuchtung

Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten Phänomene			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene im Vergleich zum Vorzustand			
		Krateränderungen	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränderungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornumgebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	AB1	1	0	1	1	0	0	0
2	J1-2	2	0	3	0	0	0	0
3	K2	2	0	2	1	0	0	0
4	B23	1	0	5	1	0	0	0
5	B4	1	0	4	0	0	0	0
6	C4	0	1	8	0	0	0	0
7	DE34	1	0	5	1	0	0	0
8	K4	3	1	0	1	0	0	0
9	I45	1	0	3	0	0	0	0
10	A67	1	0	6	1	0	0	0
11	F6	2	0	2	1	0	0	0
12	H17	1	0	6	1	0	0	0
13	I67	2	0	6	1	0	0	0
14	JK67	1	1	4	1	0	0	0
15	AB	0	0	8	0	0	0	0
16	BC89	2	1	5	1	0	0	1
17	H89	2	0	4	2	0	0	0
18	I9	1	0	1	0	0	0	0
19	BC11	2	1	2	0	0	0	0
20	I1011	2	3	1	0	0	0	0
21	JK1011	1	0	1	0	0	0	0
22	J14	1	0	0	0	0	0	0
23	J13	1	1	0	0	0	0	0
24	KL13	1	1	0	0	0	0	0
25								
Summe 1		32	10	77	13	0	0	1
Summe 2		119					14	
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]					41	0	0	1
Veränderungen gesamt [%]							12	

Testfläche 56 b II (2006)

Musterfläche	57 a II
Reinigungsverfahren	JOS, feucht-abrasives Rotationsstrahlverfahren
Reinigungsmittel	Weichstrahlmittel S (Walnußschalen), 100-250 µm
Reinigungsparameter	Spalte A-M: 0.5 bar Luftdruck, Arbeitsabstand 5 ± 1 cm, Minimalstellung Strahlgutdosierung Spalte H-M: 1.5 bar Luftdruck, Arbeitsabstand 5 ± 1 cm, Minimalstellung Strahlgutdosierung

Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten Phänomene			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene im Vergleich zum Vorzustand				
		Krateränderungen	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränderungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornumgebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner	
1	C1a	0	1	0	0	2	0	0	
2	C1b	3	1	0	3	3	1	0	
3	E2	1	1	0	1	0	0	0	
4	F1-2	3	3		3	3	1	0	
5	J2	1	0	1	1	4	0	1	
6	C34	3	0	2	3	1	0	0	
7	D4	2	1	0	2	3	0	0	
8	H4	0	0	1	0	5	0	0	
9	I4	1	1	1	1	5	1	1	
10	J4	1	0	1	1	2	0	1	
11	L5	2	0	0	2	0	0	0	
12	H5	2	3	0	2	2	1	0	
13	B6	1	1	1	1	1	0	0	
14	GH89	3	1	0	3	2	0	0	
15	IJ78	2	2	0	2	1	1	0	
16	B9	1	0	1	1	3	0	1	
17	E9	3	3	0	3	1	0	0	
18	AB10	1	1	0	1	0	0	0	
19	C1011	3	0	0	3	2	0	0	
20	DE11	6	0	0	6	1	0	0	
21	A1112	4	0	0	4	1	0	0	
22									
23									
24									
25									
Summe 1		43	19	8	43	42	5	4	
Summe 2			70			94			
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]					100	98	26	50	
Veränderungen gesamt [%]									134

Testfläche 57 a II (2006)

Musterfläche	58 b I
Reinigungsverfahren	Mikrotrockenstrahlen
Reinigungsmittel	Rotosoft Glaspulvermehl mikrofein (Weisenburger GmbH), 40-80 µm
Reinigungsparameter	0.5 bar Luftdruck, Arbeitsabstand ca. 4 cm, Strahlgutdosierung 0

Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten Phänomene			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene im Vergleich zum Vorzustand				
		Krateränderungen	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränderungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornumgebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner	
1	BC2	1	0	1	1	2	0	1	
2	EF2	3	1	0	3	0	0	0	
3	H2	2	1	1	1	1	0	0	
4	I3	3	0	0	3	2	0	0	
5	IJ4	3	0	1	2	1	0	1	
6	AB45	3	1	0	3	0	1	0	
7	B6	3	0	0	3	0	0	0	
8	JK56	2	1	0	2	2	0	0	
9	K56	2	3	0	2	1	3	0	
10	A78	3	0	1	1	0	0	1	
11	AB8	3	0	1	1	2	0	1	
12	F8	2	0	2	0	1	0	2	
13	JK67	0	4	0	0	2	2	0	
14	K9	3	1	1	2	1	1	0	
15	LM89	2	0	1	1	2	0	0	
16	A1011	1	0	0	0	0	0	0	
17	EF12	2	1	1	1	2	0	1	
18	I1011	5	0	0	5	1	0	0	
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
Summe 1		43	13	10	31	20	7	7	
Summe 2			66			65			
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]					72	47	54	70	
Veränderungen gesamt [%]									98

Testfläche 58 b I (2006)

Musterfläche	58 b 2, Reinigung b
Reinigungsverfahren	Chemische Reinigung mit Flußsäurepräparaten
Reinigungsmittel	Troplexin R (Schmatzlag GmbH)
Reinigungsparameter	Verdünnung Troplexin : Wasser = 1 : 3 Massenteile, zweimaliger Pinselauftrag

Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten Phänomene			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene im Vergleich zum Vorzustand				
		Krateränderungen	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränderungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornumgebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner	
1	C2a	4	1	1	0	0	0	0	
2	C2b	6	0	1	0	0	0	0	
3	J1	2	0	0	0	0	0	0	
4	IJ23	7	0	1	0	0	0	0	
5	HI34	1	0	1	0	0	0	0	
6	L4	4	1	0	2	0	0	0	
7	A6	2	1	0	1	0	0	0	
8	B56	2	1	0	0	0	1	0	
9	C56	2	0	0	1	0	0	0	
10	E5	2	2	0	2	1	1	0	
11	L56	2	3	1	1	0	0	0	
12	L67	4	1	0	4	0	0	0	
13	GH7	2	0	3	0	0	0	0	
14	B78	3	0	0	3	0	0	0	
15	J8	0	0	1	0	0	0	0	
16	J9	2	0	2	2	0	0	0	
17	L11	4	0	1	1	1	0	0	
18	KL11	3	0	1	1	0	0	0	
19	IJ1011	2	2	0	1	0	0	0	
20	E11	3	0	0	3	0	0	0	
21									
22									
23									
24									
25									
Summe 1		57	12	13	22	2	2	0	
Summe 2			82			26			
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]					39	4	17	0	
Veränderungen gesamt [%]									32

Testfläche 58 b IIb (2006)

Musterfläche	64 a, Reinigungsversuch a
Reinigungsverfahren	Vorfeuchten mit Nebulizzatore, danach JOS-Strahlen
Reinigungsmittel	Edelkorund F 600 (Hasenratz), 8-10 µm
Reinigungsparameter	60 min Vorfeuchten, Luftdruck 1 bar, Wasserdruck 3 bar, Objektabstand 4,5 cm JOS-Strahlen mit 0.5 bar, Arbeitsabstand 5 ± 1 cm, Minimalstellung Strahlgutdosierung

Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten Phänomene			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene im Vergleich zum Vorzustand				
		Krateränderungen	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränderungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornumgebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner	
1	B2	2	0	4	1	0	0	0	
2	O2	0	0	4	0	0	0	0	
3	G3	1	0	2	1	0	0	0	
4	G4	1	0	4	1	0	0	1	
5	P4	1	0	2	0	0	0	0	
6	FG56	0	0	6	0	0	0	0	
7	I6	1	0	0	0	0	0	0	
8	N6	1	0	1	1	0	0	0	
9	E78	2	1	0	0	0	0	0	
10	G8	0	2	1	0	0	0	0	
11	H8	2	0	3	0	0	0	0	
12	M7	0	0	2	0	0	0	0	
13	N7	3	1	1	0	0	0	0	
14	N8	3	1	0	0	0	0	0	
15	EF10	2	2	1	1	0	0	0	
16	GH10	1	0	1	1	0	0	0	
17	J10	0	1	2	0	0	0	0	
18	JK9	1	0	1	1	0	0	0	
19	M910	4	0	0	1	0	0	0	
20	MNG10	2	0	1	0	0	0	0	
21	O9	1	1	2	0	0	0	1	
22									
23									
24									
25									
Summe 1		28	9	38	8	0	0	2	
Summe 2			75			10			
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]					29	0	0	5	
Veränderungen gesamt [%]									13

Testfläche 64 aa (2006)

Musterfläche	64 a, Reinigungsversuch a
Reinigungsverfahren	Vorfeuchten mit Nebulizatore, danach JOS-Strahlen
Reinigungsmittel	Edelkorund F 600 (Hasenfratz), 8-10 µm
Reinigungsparameter	60 min Vorfeuchten, Luftdruck 1 bar, Wasserdruck 3 bar, Objektelastand 4,5 cm JOS-Strahlen mit 0,5 bar, Arbeitsabstand 5 ± 1 cm, Minimalstellung Strahlgutdosierung

Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten Phänomene			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene im Vergleich zum Vorzustand			
		Krateränder	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränder- veränder- ungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornum- gebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	B2	2	0	4	1	0	0	0
2	O2	0	0	4	0	0	0	0
3	G3	1	0	2	1	0	0	0
4	G4	1	0	4	1	0	0	1
5	P4	1	0	2	0	0	0	0
6	FG56	0	0	6	0	0	0	0
7	I6	1	0	0	0	0	0	0
8	N6	1	0	1	1	0	0	0
9	E78	2	1	0	0	0	0	0
10	G8	0	2	1	0	0	0	0
11	H8	2	0	3	0	0	0	0
12	M7	0	0	2	0	0	0	0
13	N7	3	1	1	0	0	0	0
14	N8	3	1	0	0	0	0	0
15	EF10	2	2	1	1	0	0	0
16	GH10	1	0	1	1	0	0	0
17	J10	0	1	2	0	0	0	0
18	JK9	1	0	1	1	0	0	0
19	MS910	4	0	0	1	0	0	0
20	MNS910	2	0	1	0	0	0	0
21	O9	1	1	2	0	0	0	1
22								
23								
24								
25								
Summe 1		28	9	38	8	0	0	2
Summe 2		75				10		
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]					29	0	0	5
Veränderungen gesamt [%]					13			

Testfläche 64 ab (2006)

Musterfläche	64 b
Reinigungsverfahren	Chemische Reinigung mit Flusssäurepräparaten
Reinigungsmittel	Ammoniumhydrogenfluorid (NH ₄)HF ₂
Reinigungsparameter	Lösungskonzentration 3 M-%, sechsmaliger Pinselauftrag, Dauer 12 min

Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten Phänomene			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene im Vergleich zum Vorzustand			
		Krateränder	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränder- veränder- ungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornum- gebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	CD1-2	1	1	5	1	0	0	0
2	IJ1-2	2	2	2	0	0	0	0
3	K1-2	1	2	4	1	1	0	0
4	M1	1	0	1	0	0	0	0
5	D3	2	0	6	2	0	0	0
6	E3	3	1	4	1	0	0	0
7	F3	3	2	5	1	0	0	0
8	G23	0	0	2	0	0	0	0
9	NO34	1	1	2	1	0	0	0
10	OP34	4	1	0	1	0	0	0
11	A4	1	0	5	1	0	0	0
12	A5	1	0	4	1	0	0	0
13	B5	2	0	7	2	0	0	0
14	F5	2	2	5	1	1	0	0
15	P56	1	1	0	0	0	0	0
16	LM56	1	0	1	1	1	0	0
17	P7	4	1	0	1	0	1	0
18	O8	3	0	0	2	0	0	0
19	F9	0	3	2	0	0	1	0
20	K9	0	0	4	0	0	0	2
21								
22								
23								
24								
25								
Summe 1		33	17	59	17	3	2	2
Summe 2			109			24		
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]					52	9	12	3
Veränderungen gesamt [%]					22			

Testfläche 64 b (2006)

Musterfläche	65 a I
Reinigungsverfahren	Vorfeuchten mit Kompress, danach JOS-Strahlen
Reinigungsmittel	Ethanol : Wasser (deionisiert) = 1 : 1 Volumenteile:Edelkorund F 600 (Hasenfratz), 8-10 µm 15 min Kompress,
Reinigungsparameter	JOS-Strahlen mit 0,5 bar, Arbeitsabstand 5 ± 1 cm, minimale Strahlgutmenge

Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten Phänomene			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene im Vergleich zum Vorzustand			
		Krateränder	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränder- veränder- ungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornum- gebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	DE1-2	3	0	4	1	0	0	0
2	I1-2	0	0	2	0	0	0	0
3	K1	1	0	0	0	0	0	0
4	L1-2	3	0	4	0	0	0	0
5	A3	2	0	2	2	0	0	0
6	D34	3	0	0	1	0	0	0
7	E2-3	1	0	1	1	0	0	0
8	E34	1	1	0	1	0	0	0
9	JK34	0	0	3	0	0	0	4
10	A45	1	1	7	0	0	0	5
11	EF45	2	0	2	0	0	0	1
12	IJ45	1	2	2	0	0	0	0
13	K45	1	0	3	0	0	0	3
14	K6	1	0	0	0	0	0	0
15	BC78	2	0	3	1	0	0	0
16	HI78	0	0	1	0	0	0	0
17	CD910	2	2	0	2	0	0	0
18	GH1112	1	0	3	1	0	0	0
19	I1112	2	0	3	0	0	0	0
20	LM12	1	2	3	0	0	0	0
21								
22								
23								
24								
25								
Summe 1		28	8	43	10	0	0	13
Summe 2		79				23		
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]					36	0	0	30
Veränderungen gesamt [%]					29			

Testfläche 65 a I (2006)

Musterfläche	65 a II
Reinigungsverfahren	Vorfeuchten mit Heißdampf, danach JOS-Strahlen
Reinigungsmittel	Edelkorund F 600 (Hasenfratz), 8-10 µm 5 min Dampfstrahlen,
Reinigungsparameter	JOS-Strahlen mit 0,5 bar, Arbeitsabstand 5 ± 1 cm, minimale Strahlgutmenge

Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten Phänomene			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene im Vergleich zum Vorzustand			
		Krateränder	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränder- veränder- ungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornum- gebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	AB2	3	0	1	2	0	0	0
2	E1	0	0	2	0	0	0	0
3	I2	2	0	3	1	0	0	0
4	D3	0	1	3	0	0	0	0
5	DE2	2	0	0	1	0	0	0
6	JK3	0	3	0	0	0	0	0
7	DE45	1	0	2	0	0	0	0
8	D4	1	0	2	0	0	0	0
9	LM4	3	0	0	1	0	0	0
10	J5	3	0	2	1	0	0	0
11	I6	1	0	3	0	0	0	0
12	H67	1	0	2	0	0	0	0
13	GH6	2	0	2	1	0	0	0
14	G5	2	2	0	0	0	0	0
15	B8	1	0	8	1	0	0	6
16	K1213	1	0	0	0	0	0	0
17	GH1213	1	0	2	1	0	0	0
18	AB12	2	0	4	1	0	0	0
19	L10	2	0	0	0	0	0	0
20								
21								
22								
23								
24								
25								
Summe 1		28	6	36	10	0	0	6
Summe 2		70				16		
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]					36	0	0	17
Veränderungen gesamt [%]					23			

Testfläche 65 a II (2006)

Orientierung		Anzahl der ausgewerteten Phänomene			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene im Vergleich zum Vorzustand			
Nr.	Position	Krateränder	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränderveränderungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornumgebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	A1	0	2	0	0	0	0	0
2	B1	4	1	0	0	0	0	0
3	E1	1	0	1	0	0	0	0
4	J1-2	0	2	2	0	0	0	0
5	A2	2	0	0	1	0	0	0
6	BC2	2	0	0	0	0	0	0
7	J2	1	1	1	0	0	0	0
8	B3	1	3	2	1	0	0	0
9	C3	2	0	0	0	0	0	0
10	K34	4	0	1	0	0	0	0
11	F5	2	0	1	0	0	0	0
12	B5	3	2	1	1	0	0	0
13	J56	0	2	0	0	0	0	0
14	B6	3	1	1	1	0	0	0
15	C6	2	1	2	0	0	0	0
16	DE6	4	0	1	0	0	0	0
17	J7	1	1	0	0	0	0	0
18	E7	1	0	2	0	0	0	0
19	AB910	3	0	1	1	0	0	0
20	I1112	0	0	5	0	0	0	0
21								
22								
23								
24								
25								
Summe 1		36	16	21	5	0	0	0
Summe 2			73			5		
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]					14	0	0	0
Veränderungen gesamt [%]						7		

Testfläche 66 b I (2006)


12.4.2 Gereinigte Testflächen 2005 (Prüfkörpertypus Albanisches Gitter)

Orientierung		Anzahl der ausgewerteten Phänomene			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene im Vergleich zum Vorzustand			
Nr.	Position	Krateränder	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränderveränderungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornumgebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	EF6	0	1	1	0	0	0	0
2	DE5	0	0	0	0	0	0	0
3	B6	1	0	0	1	0	0	0
4	E7.1	3	1	0	2	1	0	0
5	E7.2	1	0	0	0	0	0	0
6	D6.2	0	0	4	0	0	0	0
7	SB.1	1	0	0	1	0	0	0
8	SB.2	2	0	0	1	0	0	0
9	D12	0	0	0	0	0	0	0
10	AB2	0	0	0	0	0	0	0
11	E2	0	0	0	0	0	0	0
12	F3.1	0	0	0	0	0	0	0
13	F3.2	0	0	0	0	0	0	0
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
Summe 1		8	2	5	5	1	0	0
Summe 2			15			6		
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]					63	13	0	0
Veränderungen gesamt [%]						40		

 nicht auswertbar

Testfläche 42 a I (2005)

Orientierung		Anzahl der ausgewerteten Phänomene			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene im Vergleich zum Vorzustand			
Nr.	Position	Krateränder	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränderveränderungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornumgebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	B4.1	1	0	0	1	0	0	0
2	B4.2	1	0	0	1	0	0	0
3	F4	2	0	0	2	0	0	0
4	A45.1	3	2	0	1	0	0	0
5	A4.5.2	1	2	0	0	0	0	0
6	B56.1	0	0	0	0	0	0	0
7	C6	0	0	0	0	0	0	0
8	CD6.1	0	0	0	0	0	0	0
9	CD6.2	2	0	0	0	0	0	0
10	A5	2	1	0	2	0	0	0
11	B56.2	1	0	0	0	0	0	0
12	F6	3	1	0	0	0	0	0
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
Summe 1		16	6	0	7	0	0	0
Summe 2			22			7		
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]					44	0	0	0
Veränderungen gesamt [%]						32		

 nicht auswertbar

Testfläche 42 a II (2005)

Musterfläche		53 b I						
Reinigungsverfahren		Mikrotrockenstrahlen						
Reinigungsmittel		Edelkorund F 600 (Hasenfratz), 8-10 µm						
Reinigungsparameter		0,5 bar Luftdruck, Arbeitsabstand 2 cm						
Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten Phänomene			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene im Vergleich zum Vorzustand			
		Krateränder	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränder- veränder- ungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornum- gebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	B2	2	0	0	1	0	0	0
2	C5	0	1	2	0	0	0	0
3	F56	1	0	0	0	0	0	0
4	B6.1	0	1	0	0	0	0	0
5	C5.1	1	0	0	1	0	0	0
6	C5.2	1	1	0	1	0	0	0
7	B4	3	2	0	1	0	0	0
8	B3	2	4	0	1	0	0	0
9	A3	1	4	0	0	0	0	0
10	A1.1	3	1	0	1	0	0	0
11	A.1.2	2	3	0	1	1	0	0
12	B1	4	1	0	1	0	0	0
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
Summe 1		20	18	2	8	1	0	0
Summe 2		40			9			
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]					40	5	0	0
Veränderungen gesamt [%]		23						


Testfläche 53 b I (2005)

Musterfläche		53 b II						
Reinigungsverfahren		Mikrotrockenstrahlen						
Reinigungsmittel		Edelkorund F 600 (Hasenfratz), 8-10 µm						
Reinigungsparameter		1,0 bar Luftdruck, Arbeitsabstand 4 cm						
Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten Phänomene			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene im Vergleich zum Vorzustand			
		Krateränder	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränder- veränder- ungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornum- gebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	C3.1	3	1	0	0	1	0	0
2	C3.2	3	1	0	3	1	0	0
3	B3	2	0	1	1	0	0	0
4	B4	2	1	0	1	1	0	0
5	C2	2	0	1	1	0	0	0
6	BC2							
7	A5							
8	AB6							
9	B.2	2	1	0	1	0	0	0
10	D1	1	1	0	1	0	0	0
11	E2	0	1	1	0	0	0	1
12	E3	1	1	0	1	0	0	0
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
Summe 1		16	7	3	9	3	0	1
Summe 2		26			13			
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]					56	19	0	33
Veränderungen gesamt [%]		50						

 nicht auswertbar

Testfläche 53 b II (2005)

Musterfläche		58 a I						
Reinigungsverfahren		Mikrotrockenstrahlen						
Reinigungsmittel		Edelkorund F 1200 (Hasenfratz), 2-4 µm						
Reinigungsparameter		0,5 und 1,0 bar Luftdruck, Arbeitsabstand 1 cm						
Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten Phänomene			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene im Vergleich zum Vorzustand			
		Krateränder	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränder- veränder- ungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornum- gebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	AB2	3	1	1	2	0	0	0
2	B3	1	2	0	0	0	0	0
3	C3	0	0	2	0	0	0	0
4	E3							
5	E3.1	1	0	0	0	0	0	0
6	AB4	0	1	0	0	0	0	0
7	B4	3	4	1	0	0	0	0
8	A4	1	0	0	0	0	0	0
9	E3.2	1	0	0	1	0	0	0
10	D3	0	0	2	0	0	0	0
11	B7	2	0	0	0	0	0	0
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
Summe 1		12	8	6	3	0	0	0
Summe 2		26			3			
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]					25	0	0	0
Veränderungen gesamt [%]		12						

 nicht auswertbar

Testfläche 58 a I (2005)

Musterfläche		58 a II						
Reinigungsverfahren		Mikrotrockenstrahlen						
Reinigungsmittel		Edelkorund F 1200 (Hasenfratz), 2-4 µm						
Reinigungsparameter		1,5 bar Luftdruck, Arbeitsabstand 1 cm						
Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten Phänomene			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene im Vergleich zum Vorzustand			
		Krateränder	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränder- veränder- ungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornum- gebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	F7	2	0	0	0	0	0	0
2	D34	3	0	1	2	1	0	0
3	C4	2	0	0	2	0	0	0
4	B4	2	0	2	1	0	0	0
5	B3	2	1	1	0	0	0	0
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
Summe 1		11	1	4	5	1	0	0
Summe 2		16			6			
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]					45	9	0	0
Veränderungen gesamt [%]		38						

Testfläche 58 a II (2005)

Musterfläche	68 b I
Reinigungsverfahren	Mikrotrockenstrahlen
Reinigungsmittel	Rotosoft Steinpulvermehl (Weisenburger GmbH), 5-300 µm
Reinigungsparameter	0,5 bar Luftdruck, Arbeitsabstand 2 cm

Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten Phänomene			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene im Vergleich zum Vorzustand			
		Kraterländer	Quarzkorn und Umgebungen	Aufstehendes Korn	Kraterlandveränderungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornumgebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	C1	1	0	1	0	0	0	0
2	F2	0	0	0	0	0	0	0
3	D1	2	0	0	2	3	0	0
4	B23	2	0	0	2	0	0	0
5	A3	6	0	1	5	0	0	0
6	B3	1	0	0	1	0	0	0
7	C34							
8	B4	1	0	0	1	1	0	0
9	B6							
10	B7	1	0	0	1	0	0	0
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
Summe 1		14	0	2	12	4	0	0
Summe 2		16			16			
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]					86	29	0	0
Veränderungen gesamt [%]					100			

 nicht auswertbar

Testfläche 68 b I (2005)

Musterfläche	68 b II
Reinigungsverfahren	Mikrotrockenstrahlen
Reinigungsmittel	Rotosoft Steinpulvermehl (Weisenburger GmbH), 5-300 µm
Reinigungsparameter	1,0 bar Luftdruck, Arbeitsabstand 2-4 cm

Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten Phänomene			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene im Vergleich zum Vorzustand			
		Kraterländer	Quarzkorn und Umgebungen	Aufstehendes Korn	Kraterlandveränderungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornumgebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	BC2	0	1	0	0	0	0	0
2	B2.1	3	1	0	3	0	0	0
3	B2.2	1	0	1	1	0	0	0
4	A4	2	0	1	0	0	0	0
5	D3	1	0	0	1	0	0	0
6	D34	3	1	1	0	0	0	0
7	B4	2	1	0	1	0	0	0
8	BC4	2	0	0	2	0	0	0
9	D6	1	0	1	1	0	0	1
10	CD6	2	0	0	0	2	0	0
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
Summe 1		17	4	4	9	2	0	1
Summe 2		25			12			
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]					53	12	0	25
Veränderungen gesamt [%]					48			

Testfläche 68 b II (2005)

12.5 Bewertung von Schadensindikatoren an Testflächen des Prüfkörpertypus Amphorenfußbruchstück

12.5.1 Gereinigte Testflächen 2006

Musterfläche	AF 1 (Amphorenfuß)
Reinigungsverfahren	Mikrotrockenstrahlen
Reinigungsmittel	Rotosoft Glaspudermehl microfine (Weisenburger GmbH), 40-80 µm
Reinigungsparameter	Luftdruck 0,5 bar, Arbeitsabstand ca. 4 cm, Strahlgutdosierung 0-1

Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene			
		Krateränder	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränderveränderungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornumgebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	BC 1112	5	1	1	0	0	0	0
2	C13	4	1	0	0	0	0	0
3	DE15	3	4	2	0	0	0	0
4	DE13	3	2	0	0	0	0	0
5	EF13	1	1	0	0	0	0	0
6	E910	5	0	0	0	0	0	0
7	F1112	4	0	0	0	0	0	0
8	G14	0	1	3	0	0	0	0
9	H1213	1	0	2	0	0	0	0
10	GH12	1	1	1	0	0	0	0
11	HI15	2	1	0	0	0	0	0
12	J14	5	5	0	0	0	0	0
13	J12	0	1	1	0	0	0	0
14	J12	2	1	1	0	0	0	0
15	KL1213	0	5	1	0	0	0	0
16	LM1213	1	3	3	0	0	0	1
17	L12	2	2	0	1	0	0	0
18	M9	1	0	0	0	0	0	0
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
Summe 1		40	29	14	1	0	0	1
Summe 2			83			2		
Veränderungen einzelner Indikatoren (%)					3	0	0	7
Veränderungen gesamt (%)						2		

Testfläche AF 1 (2006)

Musterfläche	AF 2 (Amphorenfuß)
Reinigungsverfahren	Mikrotrockenstrahlen
Reinigungsmittel	Edelkorund F 600 (Hasenratz), 8-10 µm
Reinigungsparameter	Luftdruck 0,5 bar, Arbeitsabstand ca. 4 cm, Strahlmitteldosierung 1-2

Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene			
		Krateränder	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränderveränderungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornumgebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	C34	2	0	0	1	0	0	0
2	C5	2	1	1	0	0	0	0
3	C6	1	0	2	0	0	0	1
4	EF56	1	0	2	0	0	0	0
5	F56	2	3	2	1	0	0	0
6	E45	1	0	0	1	0	0	0
7	E23	2	1	2	0	0	0	0
8	F7	2	0	1	0	0	0	0
9	G7	1	0	0	0	0	0	0
10	G34	1	0	1	1	0	0	0
11	J7	1	1	0	0	0	0	0
12	N56	0	1	4	0	0	0	1
13	M5	3	1	0	0	0	0	0
14	MN1-2	1	1	1	0	0	0	0
15	N1-2	2	3	0	0	0	0	0
16	NO6	0	2	2	0	0	0	0
17	JK1	1	0	3	0	0	0	0
18	I2	2	0	1	0	0	0	0
19	K5	1	0	1	0	0	0	0
20	O7	1	0	2	0	0	0	0
21								
22								
23								
24								
25								
Summe 1		27	14	25	4	0	0	2
Summe 2			66			6		
Veränderungen einzelner Indikatoren (%)					15	0	0	8
Veränderungen gesamt (%)						9		

Testfläche AF 2 (2006)

Musterfläche	AF 3 (Amphorenfuß)
Reinigungsverfahren	Laserstrahlen
Reinigungsmittel	gepulster Nd:YAG-Laser Artlight NL 102 (Fa. BM Industries / Soliton)
Reinigungsparameter	1064 nm, 120-1600 mJ, Fokus 3, mit Oberflächenbefeuchtung

Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene			
		Krateränder	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränderveränderungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornumgebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	A14	1	3	0	0	0	0	0
2	AB1213	2	0	1	0	0	0	0
3	BC12	3	3	0	0	0	0	0
4	C9	1	0	2	0	0	0	0
5	DE15	2	0	0	0	0	0	0
6	CD1415	3	0	0	0	0	0	0
7	E15	1	0	3	0	0	0	0
8	DE1314	1	0	0	0	0	0	0
9	FG1213	2	2	0	0	0	0	0
10	FG1112	2	0	0	0	0	0	0
11	G1011	1	2	1	0	0	0	0
12	I15	3	0	0	0	0	0	0
13	I1314	1	0	1	0	0	0	0
14	I11	0	1	0	0	0	0	0
15	I1011	0	3	0	0	0	0	0
16	K15	1	1	0	0	0	0	0
17	JK12	0	3	0	0	0	0	0
18	KL12	1	3	1	0	0	0	0
19	L10	2	0	0	0	0	0	0
20	M10	2	0	0	0	0	0	0
21								
22								
23								
24								
25								
Summe 1		29	21	9	0	0	0	0
Summe 2			59			0		
Veränderungen einzelner Indikatoren (%)					0	0	0	0
Veränderungen gesamt (%)						0		

Testfläche AF 3 (2006)

Musterfläche	AF 4 (Amphorenfuß)
Reinigungsverfahren	JOS, feucht-abrasives Rotationsstrahlverfahren
Reinigungsmittel	Rotosoft Glaspudermehl microfine (Weisenburger GmbH), 40-80 µm
Reinigungsparameter	Luftdruck 0,5 bar, Arbeitsabstand 5 ± 1 cm, Minimalstellung Strahlgutdosierung

Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene			
		Krateränder	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränderveränderungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornumgebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	A2	2	1	0	1	0	0	0
2	A23	0	1	1	0	0	0	0
3	A45	2	1	0	0	0	0	0
4	B1-2	1	0	0	0	0	0	0
5	BC7	1	0	1	0	0	0	0
6	C4	4	0	0	0	0	0	0
7	D7	2	0	0	0	0	0	0
8	F4	2	1	1	0	0	0	0
9	G23	1	1	0	0	0	0	0
10	H56	0	1	2	0	0	0	0
11	HI23	0	0	2	0	0	0	0
12	IJ56	1	2	0	0	0	0	0
13	J23	1	1	0	1	0	0	0
14	K6	1	2	0	0	0	0	0
15	L6	1	6	0	0	0	0	0
16	LM6	2	1	1	0	0	0	0
17	NO67	0	4	0	0	0	0	0
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
Summe 1		21	22	8	2	0	0	0
Summe 2			51			2		
Veränderungen einzelner Indikatoren (%)					10	0	0	0
Veränderungen gesamt (%)						4		

Testfläche AF 4 (2006)

Musterfläche		AF 5 (Amphorenfuß)						
Reinigungsverfahren		JOS, feucht-abrasives Rotationsstrahlverfahren						
Reinigungsmittel		Edelkorund F 600 (Hasenfratz), 8-10 µm						
Reinigungsparameter		Luftdruck 0,5 bar, Arbeitsabstand 5 ± 1 cm, Minimalstellung Strahlguidosierung						
Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene			
		Krateränder	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränder- veränder- ungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornum- gebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	A1213	1	1	0	0	0	0	0
2	A1011	0	0	2	0	0	0	0
3	AB9	2	3	4	1	0	0	0
4	CD1011	0	1	1	0	0	0	0
5	DE11	1	0	2	0	0	0	0
6	E10	4	0	1	1	0	0	0
7	EF1415	2	1	3	0	0	0	0
8	F13	1	0	1	0	0	0	0
9	F910	1	2	0	0	0	0	0
10	G1011	1	0	0	0	0	0	0
11	GH9	0	2	0	0	0	0	0
12	HI12	1	2	0	1	0	0	0
13	HI1011	3	1	0	0	0	0	0
14	J9	2	1	0	0	0	0	0
15	JK1011	3	0	0	1	0	0	0
16	KL10	4	0	2	1	0	0	0
17	NI415	3	0	0	1	0	0	0
18	NI314	1	1	0	0	0	0	0
19	NS10	1	0	1	1	0	0	0
20	OP1011	1	1	0	0	0	0	0
21								
22								
23								
24								
25								
Summe 1		32	16	17	7	0	0	0
Summe 2			65			7		
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]					22	0	0	0
Veränderungen gesamt [%]						11		

Testfläche AF 5 (2006)

Musterfläche		AF 7 (Amphorenfuß)						
Reinigungsverfahren		Chemische Reinigung mit Flusssäurepräparaten						
Reinigungsmittel		(NH ₄)HF ₂						
Reinigungsparameter		Lösungskonzentration 3 M.-%, siebenmaliger Pinselauftrag, Dauer 13,5 min						
Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene			
		Krateränder	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränder- veränder- ungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornum- gebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	B7	3	1	0	0	0	0	1
2	A6	1	0	1	1	0	0	0
3	AB6	2	1	1	0	0	0	0
4	AB5	1	0	1	0	0	0	0
5	AB34	0	0	3	0	0	0	0
6	A1	1	0	2	0	0	0	0
7	B23	1	0	1	0	0	0	0
8	C67	3	3	1	0	0	0	0
9	CD6	2	0	0	0	0	0	0
10	C4	1	4	0	0	0	0	0
11	D2	2	0	0	0	0	0	0
12	F7	2	4	0	0	0	0	0
13	E6	3	2	0	0	0	0	0
14	H6	2	3	1	0	0	0	0
15	HI5	1	2	0	0	0	0	0
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
Summe 1		25	20	11	1	0	0	1
Summe 2			56			2		
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]					4	0	0	9
Veränderungen gesamt [%]						4		

Testfläche AF 7 (2006)

Musterfläche		AF 6 (Amphorenfuß)						
Reinigungsverfahren		Vorfeuchten mit Kompressen, danach JOS-Strahlen						
Reinigungsmittel		Ethanol : Wasser (deionisiert) = 1 : 1 Volumenteile						
Reinigungsparameter		Edelkorund 600 (Hasenfratz), 8-10 µm 15 min Kompresseneinwirkung, JOS-Strahlen mit 0,5 bar Luftdruck, Arbeitsabstand 5 ± 1 cm, Maximalstellung Strahlguidosierung						
Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene			
		Krateränder	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränder- veränder- ungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornum- gebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	A66	3	0	0	3	0	0	0
2	B4	2	1	0	2	0	0	0
3	C34	2	1	1	1	0	0	1
4	CD7	1	3	0	0	0	1	0
5	C1-2	2	0	1	1	0	0	0
6	D66	2	3	0	1	0	1	0
7	DE4	5	0	0	4	0	0	0
8	DE2	3	1	0	3	0	1	0
9	D1	3	0	0	3	0	0	0
10	E1	0	0	1	0	2	0	1
11	F6	3	0	0	3	0	0	0
12	IJ6	2	2	0	2	0	1	0
13	K34	1	0	0	1	0	0	0
14	JK2	1	1	2	1	1	0	2
15	KL1	2	0	1	2	0	0	1
16	MN66	0	2	0	0	0	0	0
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
Summe 1		32	14	6	27	3	4	5
Summe 2			52			39		
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]					84	9	29	83
Veränderungen gesamt [%]						75		

Testfläche AF 6 (2006)

Musterfläche		AF 11 (Amphorenfuß)						
Reinigungsverfahren		Chemische Reinigung mit Flusssäurepräparaten						
Reinigungsmittel		Fluorwasserstoffsäure (HF)						
Reinigungsparameter		Lösungskonzentration 1 M.-%, neunmaliger Pinselauftrag, Dauer 21 min						
Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene			
		Krateränder	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Krateränder- veränder- ungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornum- gebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	O7	0	0	1	0	0	0	0
2	N7	3	1	1	2	0	0	1
3	LM45	1	2	0	0	0	0	0
4	LM34	1	0	0	1	0	0	0
5	LM3	3	2	0	0	0	0	0
6	L2	2	0	0	0	0	0	0
7	L7	0	5	0	0	0	0	0
8	K23	2	0	0	1	0	0	0
9	IJ23a	1	3	0	0	0	0	0
10	IJ23b	1	0	2	0	0	0	1
11	HI6	0	1	1	0	0	0	0
12	IS6	0	1	0	0	0	0	0
13	IS	0	1	1	0	0	0	0
14	H1	1	0	0	0	0	0	0
15	FG1-2	1	0	0	1	0	0	0
16	F45	5	1	0	0	0	0	0
17	CS	0	2	0	0	0	0	0
18	A3	1	0	2	0	0	0	0
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
Summe 1		22	19	8	5	0	0	2
Summe 2			49			7		
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]					23	0	0	25
Veränderungen gesamt [%]						14		

Testfläche AF 11 (2006)

Musterfläche	AF 12 (Amphorenfuß)
Reinigungsverfahren	Chemische Reinigung mit Flusssäurepräparaten
Reinigungsmittel	Troplexin (Schmalstieg GmbH)
Reinigungsparameter	Verdünnung Troplexin : Wasser = 1 : 3 Volumenteile, fünfmaliger Pinselauftrag, Dauer 8,5 min

Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene			
		Kraterlöcher	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Kraterveränderungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornumgebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	B12	0	0	1	0	0	0	0
2	AB12	0	0	1	0	0	0	0
3	D15	1	5	0	0	0	5	0
4	DE13	2	0	1	0	0	0	1
5	DE12	1	1	1	0	0	0	0
6	D10	3	2	0	0	0	0	0
7	E9	1	0	1	1	0	0	1
8	E14	0	1	0	0	0	0	0
9	F14	3	3	0	0	0	0	0
10	F1213	3	0	0	0	0	0	0
11	G9	1	1	1	1	1	0	1
12	H10	2	3	1	2	0	1	1
13	GH1213	1	1	1	0	0	1	1
14	HI910	1	1	0	1	0	0	0
15	I12	1	1	1	1	0	1	0
16	I11	0	5	0	0	0	1	0
17	K1314	5	3	0	5	0	1	0
18	KL1112	0	3	1	0	0	3	1
19	KL9	0	3	1	0	0	0	1
20	LM89	2	2	2	2	1	1	0
21	NO15	1	0	1	1	0	0	0
22								
23								
24								
25								
Summe 1		28	35	14	14	2	14	7
Summe 2			77				37	
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]				50	7	40	50	
Veränderungen gesamt [%]								48

Testfläche AF 12 (2006)

12.5.2 Gereinigte Testflächen 2005 (Probekörpertypus Amphorenfußbruchstück)

Musterfläche	AF 8 (Amphorenfuß)
Reinigungsverfahren	Mikrotrockenstrahlen
Reinigungsmittel	Edelkorund F 600 (Hasenfratz), 8-10 µm
Reinigungsparameter	Luftdruck 1,0 bar, Arbeitsabstand 5-10 mm, Strahlmitteldosierung 2

Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene			
		Kraterlöcher	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Kraterveränderungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornumgebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	D2	2	0	0	0	0	0	0
2	C12	1	0	1	0	0	0	0
3	A7	1	1	0	0	0	0	0
4	A6	4	0	0	0	0	0	0
5	B6	2	1	0	0	0	0	0
6	C8	0	0	3	0	0	0	0
7	C7	1	0	0	0	0	0	0
8	C3	1	2	0	0	0	1	0
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
Summe 1		12	4	4	0	0	1	0
Summe 2			20				1	
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]				0	0	25	0	
Veränderungen gesamt [%]								5

Testfläche AF 8 (2005)

Musterfläche	AF 10 (Amphorenfuß)
Reinigungsverfahren	Mikrotrockenstrahlen
Reinigungsmittel	Steinpulvermehl auf Kalkbasis (Weisenburger GmbH), 5-300 µm
Reinigungsparameter	Luftdruck 1,0 bar, Arbeitsabstand 4-7 mm, Strahlmitteldosierung 2

Nr.	Position	Anzahl der ausgewerteten			Anzahl der eindeutig veränderten Phänomene			
		Kraterlöcher	Quarzkorn und Umgebung	Aufstehendes Korn	Kraterveränderungen	zusätzliche Krater	beschädigte Kornumgebungen	eliminierte / beschädigte aufstehende Körner
1	A8	1	1	0	0	0	0	0
2	A67	1	0	0	1	0	0	0
3	A5	2	1	0	2	1	0	0
4	A4	3	0	0	3	0	0	0
5	C7	2	1	0	1	0	0	0
6	C8	0	0	1	0	0	0	0
7	B6	1	0	0	0	0	0	0
8	A3	4	0	2	1	0	0	1
9	D3	1	0	0	0	0	0	0
10	D4	0	4	0	0	0	0	0
11	C4	0	2	0	0	0	1	0
12	C1	1	0	0	1	1	0	0
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
Summe 1		16	9	3	9	2	1	1
Summe 2			28				13	
Veränderungen einzelner Indikatoren [%]				56	13	11	33	
Veränderungen gesamt [%]								46

Testfläche AF 10 (2005)